

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Výzkum laserové dráhy v procesu SLM pro materiál 316L

Laser Single Track Research in the SLM Process for 316L

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Student:

Bc. Matěj Pitron

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Bc. Matěj Pitron, PIT0039

Název práce: Výzkum laserové dráhy v procesu SLM pro materiál 316L

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

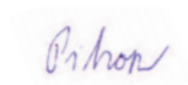
Počet stran: 60

Klíčová slova: aditivní technologie, 3D tisk, technologie SLM, laserové dráhy

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 16.5.2021

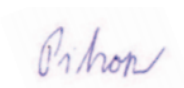


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16.5.2021



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Matěj Pitron

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rudná 792/50, Ostrava-Vítkovice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PITRON, M. Výzkum laserové dráhy v procesu SLM pro materiál 316L: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2021, 60 s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

Předkládaná diplomová práce se zabývá výzkumem laserových drah z materiálu 316L, vytvořených během procesu 3D tisku pomocí technologie SLM. V úvodní části práce je provedena rešerše poznatků o 3D tisku se zaměřením na metodu SLM. Hlavním cílem diplomové práce je provedení a vyhodnocení experimentu, který se zaměřuje na porovnání laserových drah vytvořených při změně vybraných vstupních parametrů a nalezení jejich nejlepší kombinace.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PITRON, M. Laser Single Track Research in the SLM Process for 316L: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2021, 60 p. Thesis head: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

The present thesis deals with the research of laser pathways from 316L material, created during the process of 3D printing aided by SLM technology. In the opening part of the work, a reshuffle of knowledge about 3D printing is carried out with a focus on the SLM method. The main goal of the thesis is to perform and evaluate an experiment that focuses on comparing laser pathways created when changing selected input parameters and finding their best combination.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 Cíl diplomové práce	13
3 Současný stav	14
3.1 Princip aditivní technologie	14
3.2 Výhody a nevýhody aditivní výroby.....	14
3.3 Rozdělení aditivní technologie	15
3.3.1 Tryskání pojiva (Binder jetting)	16
3.3.2 Vytlačování materiálu (Material extrusion)	17
3.3.3 Spékání práškové vrstvy (Powder bed fusion)	17
3.3.4 Nanášení tryskáním (Material jetting).....	18
3.3.5 Přímé energetické nanášení (Direct energy deposition).....	18
3.3.6 Laminace plastů (Sheet lamination)	19
3.3.7 Fotopolymerace (Vat photo-polymerization).....	19
4 Metoda SLM	20
4.1 Laser	21
4.2 Skenování	23
4.3 Práškové materiály	24
4.3.1 Metoda rozprašování plynem	25
4.3.2 Metoda rozprašování plynem ve vakuu	25
4.3.3 Metoda rozprašování pomocí plazmy	25
4.3.4 Metoda rozprašování vodou	26
4.3.5 Metoda hydride-hydride	26
4.4 Vady materiálů při využití technologie SLM	26
4.5 Mechanické vlastnosti a pórovitost	27
4.6 Omezení při tisku metodou SLM	27
4.7 Tloušťka vrstvy.....	28

4.8	Podpěry	29
4.9	Jedno vektorové dráhy v procesu SLM.....	30
5	Experimentální část	34
5.1	Popis experimentu.....	34
5.2	Zařízení pro tisk	36
5.3	Skenování povrchu vzorků a charakteristika měřicího zařízení	38
5.4	Prášek	39
5.5	Tisk vzorků a jejich hodnocení.....	40
5.5.1	Výkon laseru 100 W	41
5.5.2	Výkon laseru 200 W	43
5.5.3	Výkon laseru 300 W	45
5.5.4	Výkon laseru 400 W.....	47
5.5.5	Vliv šířky dráhy na stabilitu.....	48
6	Diskuze a výsledky.....	51
7	Závěr	54
	Seznam použité literatury.....	55
	Poděkování	60

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
BPP	parametr paprsku stroje / Beam Parameter Product	[-]
BPP_{Gauss}	parametr ideálního Gaussova paprsku	[-]
CAD	počítačem podporovaný návrh / Computer Aided Design	[-]
E	hustota energie	$[\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}]$
ET	čas expozice	$[\mu\text{s}]$
I	intenzita laserového paprsku	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
M^2	kvalita paprsku	[-]
P	nominální hodnota výkonu laseru	[W]
SLM	selektivní laserové tavení / Selective Laser Melting	[-]
UV	ultrafialové / Ultraviolet	[-]
d	průměr laserového paprsku	$[\mu\text{m}]$
h	rozteč skenování	[mm]
r_f	poloměr zaostření laserového paprsku	[mm]
t	tloušťka vrstvy	$[\mu\text{m}]$
v	skenovací rychlost laseru	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
λ	vlnová délka laseru	[nm]
ϑ_h	odchylka úhlu	$[\text{°}]$
2D	dvourozměrný	[-]
3D	trojrozměrný	[-]

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma tryskání pojiva [10]	16
Obrázek 2 - Schéma metody SLM [13]	17
Obrázek 3 - Schéma přímého energetického nanášení [15]	18
Obrázek 4 - Schéma postupu při použití technologie SLM [19]	20
Obrázek 5 - Strategie skenování [28]	23
Obrázek 6 - Barely pro převoz prášku [30]	24
Obrázek 7 - Podpěry při tisku metodou SLM [35]	29
Obrázek 8 - Vzniklé morfologie jedno vektorových drah při daných parametrech [37]	31
Obrázek 9 - Rozdělení vlastností jednotlivých vektorových drah při daných parametrech [37] ...	32
Obrázek 10 Testované vzorky [38]	33
Obrázek 11 - Rozložení drah během tisku	34
Obrázek 12 - Zařízení Renishaw AM400 [39]	37
Obrázek 13 - Zařízení Alicona Infinite Focus G5 [40]	38
Obrázek 14 - Prášek 316L [42]	39
Obrázek 15 - SEM prášku 316L, zvětšení x50 [42]	40
Obrázek 16 - Dráha: $P = 100 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 100 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	41
Obrázek 17 - Dráha: $P = 100 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 100 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20 ...	42
Obrázek 18 - Vzniklá sférizace na dráze: $P = 100 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	42
Obrázek 19 - Dráha: $P = 200 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	43
Obrázek 20 - Dráha: $P = 200 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 200 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20 ...	44
Obrázek 21 - Vzniklá nestabilita na dráze: $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	44
Obrázek 22 - Dráha: $P = 300 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 300 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	45
Obrázek 23 - Dráha: $P = 300 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 300 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20 ...	46
Obrázek 24 - Dráha: $P = 400 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 400 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	47
Obrázek 25 - Dráha: $P = 400 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 400 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	48
Obrázek 26 - Naměřené šířky na dráze: $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20	50
Obrázek 27 - Dráhy vytvořené během experimentu, zvětšení x20	51
Obrázek 28 - Rozdělení drah podle vlastností	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení aditivní technologie.....	15
Tabulka 2 - Parametry laseru	22
Tabulka 3 - Vstupní parametry tisku	35
Tabulka 4 - Parametry 3D tiskárny Renishaw AM400	37
Tabulka 5 - Fyzikální vlastnosti materiálu 316L.....	40
Tabulka 6 - Chemické vlastnosti materiálu 316L.....	40
Tabulka 7 - Šířka a vlastnosti laserových drah	49
Tabulka 8 - Dráhy s ideálními vlastnostmi	53

1 Úvod

V dnešní době, kdy se společnost ubírá směrem, co nejnižší ekologické zátěže se zvyšuje potřeba výzkumu alternativních a méně ekologicky náročných metod výroby.

Pro strojírenský průmysl se jeví jako schůdná cesta aditivní výroba. Mezi její výhody, kromě již zmíněné ekologičnosti, je možnost plnit zvyšující se nároky na tvarovou přesnost a kvalitu výrobku. Samotný pojem aditivní výroby zahrnuje mnoho technologií výroby. Mezi ně patří i metoda SLM (Selektivní laserové tavení). [1]

Princip této metody 3D tisku je spékání jednotlivých vrstev kovového prášku za sebou pomocí laseru. Díky tomu lze splnit požadavky na již zmíněnou tvarovou přesnost v podstatě bez větších omezení. To s ohledem na skutečnost, že samotný výrobek se nejprve vytváří jako CAD model, dává tvůrci, či samotnému zákazníkovi naprostou volnost při požadavcích na konečný výrobek. [1]

Takto vytvořený model se pomocí programu zvaným slicer, kde se nastaví jednotlivé parametry tisku, připraví k výrobě, což podstatně zjednodušuje samotný proces výroby, jelikož odpadají potřeby běžné pro konvenční technologie, jako je výběr vhodných řezných podmínek, volbou jednotlivých nástrojů, či dokonce potřeba více výrobních technologií pro daný díl. Další výhodou je možnost opětovného využití zvoleného prášku, což samotný proces zefektivňuje a pomáhá plnit, již zmíněné ekologické nároky. [1] [2]

Vzhledem k tomu, že takto vytvořené produkty se prezentují stejnými, nebo podobnými mechanickými vlastnostmi a rozměrovou přesností, jako ty vyrobené konvenčními metodami výroby, jedná se o velmi progresivní technologii. [1] [3]

Druhy materiálu, kterými se dá touto technologií vyrábět se neustále rozrůstá, což klade další a další požadavky, na její výzkum a následné zkvalitnění. Jedním z prvků pro výzkum jsou jednotlivé tisknuté dráhy, jejichž kvalita má výrazný vliv na konečnou kvalitu výtisku, a právě na výzkum jedno vektorových laserových drah se zaměřuje tato diplomová práce.

2 Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce, jak již bylo zmíněno, je výzkum jedno vektorových drah vytvořených laserem metodou SLM spadající pod technologii 3D tisku. Během experimentu bude vytvořeno 16 drah s měnícími se parametry. Těmi budou výkon laseru a skenovací rychlost.

Při hodnocení experimentu se zaměříme na vady vzniklé pro jednotlivé dráhy a bude zkoumána neoptimálnější varianta zvolených parametrů, tak aby mohl být vytvořen, co nejkvalitnější produkt. Zkoumané dráhy budou vytvořeny kovovým práškem materiálu 316L. Před samotným vyhodnocením experimentu bude potřeba si nastudovat problematiku technologie SLM.

Etapy vedoucí k cíli diplomové práce:

- studium základní literatury,
- detailní seznámení s technologií SLM a její popis v této diplomové práci,
- navrhnout a provést experiment výzkumu jedno vektorových drah,
- vyhodnotit získané výsledky,
- ze získaných poznatků navrhnout možnost dalšího využití.

3 Současný stav

3.1 Princip aditivní technologie

V rámci technologie aditivní výroby lze využívat různé materiály jako jsou polymery, keramika či kovy. Celý princip aditivní výroby lze zařadit do několika po sobě jdoucích kroků. Nejprve se ve vybraném CAD softwaru vyrobí potřebný 3D model. Ten je orientován podle charakteru tisknuté součásti. Pokud to daný model potřebuje je nutné k modelu vytvořit tzn. podpěry. Proto je potřeba volit vhodnou polohu modelu pro tisk, jelikož vyšší počet podpěr zvyšuje objem použitého prášku, což má vliv na konečnou výrobní cenu a čas tisku. [1] [2]

Úkolem takto vytvořených podpěr je:

- zabránit oddělení tisknutého modelu ze stavební platformy v průběhu tisku,
- odvádění vzniklého tepla z modelu,
- podpírání převislých konců modelu.

Tyto vzniklé podpěry musí být snadno odstranitelné, aby nedošlo k poškození modelu. [2]

Takto vzniklý 3D model je následně připraven k tisku v programu nazývaném slicer. V tomto programu uživatel navolí parametry potřebné pro výrobu jako jsou rychlost tisku, typ materiálu, tloušťka jednotlivých vrstev atd. Některé druhy výroby následně potřebují postprocessing, během kterého dochází k odstranění podpěr a dalším povrchovým úpravám. [1]

3.2 Výhody a nevýhody aditivní výroby

Aditivní výroba má mnoho výhod. Jednou z hlavních výhod této technologie je její flexibilita. Mnoho běžně používaných druhů technologií má své omezení, co se týká výroby tvarově složitých součástí, toto omezení však při využití aditivní technologie odpadá, a naopak otevírá možnost výroby topologicky náročných struktur.

Dále u aditivních technologií na rozdíl od obecně využívaných způsobů vzniká výrazně méně odpadu, čímž se v dnešní době, při které se klade důraz na ochranu životního prostředí dostává do popředí zájmu. Mezi další výhody se naskytá konstruktérům možnost návrhu konstrukce, aniž by se musel výrazně zabývat náročností její výroby. [1] [3] [4]

Samozřejmě má aditivní technologie i řadu nedostatků ve srovnání s ostatními výrobními procesy. Jedním z velkých problémů je rychlost samotného tisku. Ta je mnohdy výrazně nižší než u jiných technologií, což je primárně dáno způsobem výroby, při které dochází k nanášení materiálu na sebe po tenkých vrstvách. Tím aktuálně odpadá možnost využití těchto metod při hromadné výrobě.

Další nevýhodou je, že pokud je potřeba kombinovat různé druhy materiálů v jedné části, může dojít ke komplikacím z důvodů odlišných vlastností materiálu, jako je jiná reaktivita, tepelná a toková charakteristika jednotlivých užitých materiálů. [1] [3] [5]

3.3 Rozdělení aditivní technologie

Dle směrnice ISO/ASTM 52900:2015 vydané mezinárodní organizací pro standartizaci (ISO) rozeznáváme sedm výrobních procesů aditivní výroby. [6]

Mezi tyto procesy jednotlivě patří:

- tryskání pojiva,
- vytlačování materiálu,
- spékání práškové vrstvy,
- nanášení tryskáním,
- přímé energetické nanášení,
- laminace plastů,
- fotopolymerace. [7]

Tabulka 1 – Rozdělení aditivní technologie

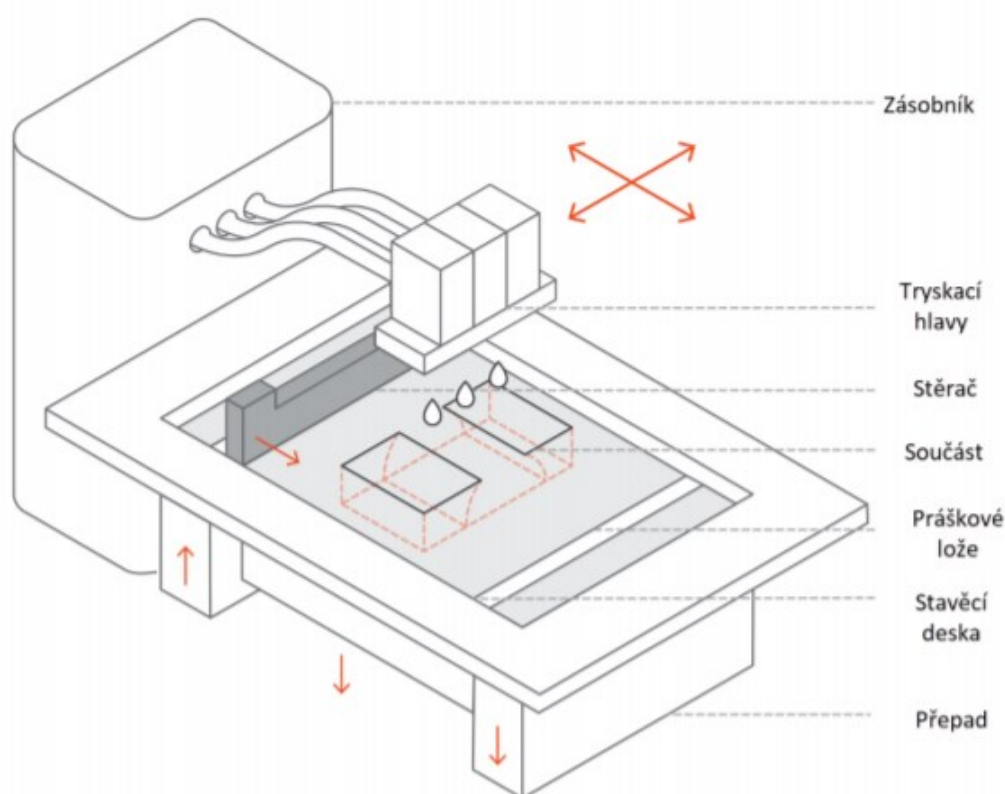
Typ výrobního pojiva	Technologie	Materiál
Tryskání pojiva	3D printing Ink-jetting S-print M-print	Kov Polymer Keramika
Vytlačování materiálu	Fused Deposition Modeling	Polymer
Spékání práškové vrstvy	Selective Laser Sintering Selective Laser Melting Electron Beam Melting	Kov Polymer Keramika
Nanášení tryskáním	Polyject Ink-jetting Thermojet	Fotopolymer Vosk
Přímé energetické nanášení	Direct Metal Deposition Laser Deposition Laser Consolidation Electron Beam Direct	Kov: prášek a drát

Laminace plastů	Ultrasonic Consolidation Laminated Object Manufacture	Kov Keramika
Fotopolymerace	Stereolithography Digital Light Processing	Fotopolymer Keramika

3.3.1 Tryskání pojiva (Binder jetting)

U technologie tryskání pojiva se využívá dvou typů materiálů. Prvním z nich je stavební materiál, který se používá ve tvaru prášků, druhým je pojivo. To se přidává ve své tekuté formě a následně funguje jako lepidlo, mezi práškovými vrstvami. Střídavé vrstvy pojiva a stavebního materiálu se nanášejí pomocí tiskové hlavy, jenž se pohybuje po osách x a y. Jakmile dojde k natištění vrstvy je objekt posunut směrem dolů a proces se opakuje. Výhodou této metody je, že neslepený materiál slouží jako opěra vznikajícího výtisku, a tak není třeba vytvářet nosné konstrukce. [8]

Finální produkt může být vyroben z většiny materiálů, jestliže je možné ho získat ve formě prášku. Tato metoda je navíc rychlá a finančně dostupná. Nevýhodou ovšem je, že vzniklý díl je velmi křehký a má omezené mechanické vlastnosti. [9]



Obrázek 1 - Schéma tryskání pojiva [10]

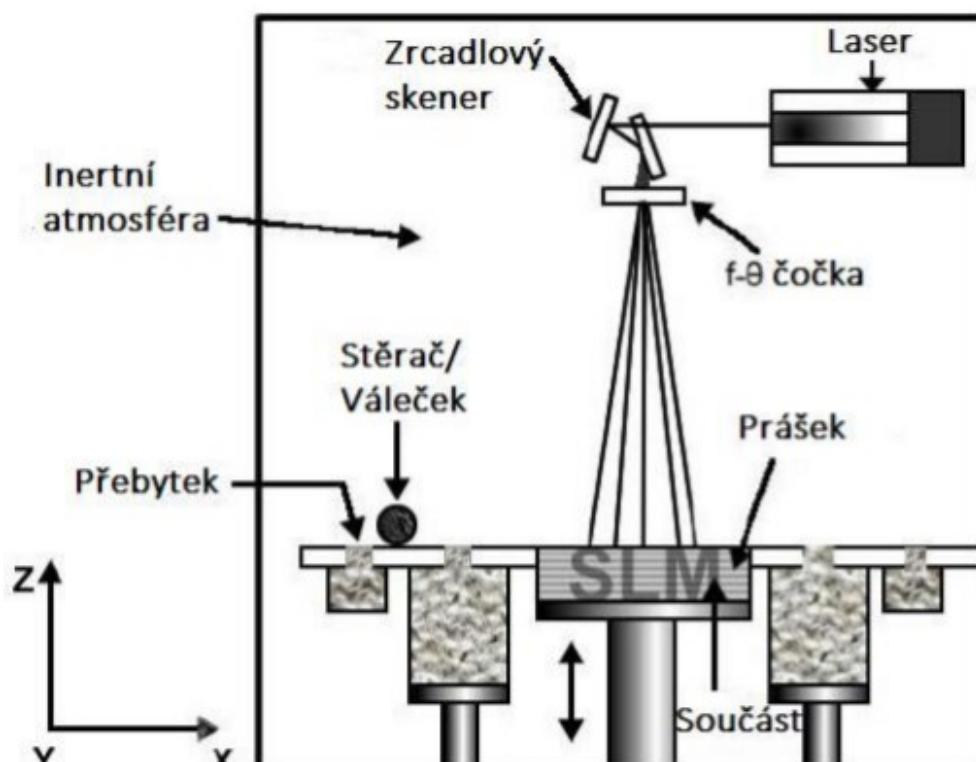
3.3.2 Vytlačování materiálu (Material extrusion)

Jedná se o nejrozšířenější metodu 3D tisku. Při této metodě se materiál roztaví a pomocí vytlačovací hlavy je posléze nanášen po vrstvách až do konečného výrobku. Pokud je potřeba touto metodou vytvářet tvarově složitější výrobek je potřeba použít podpůrný materiál. Tisk touto technologií se vyznačuje nízkou cenou, jak strojů samotných, tak i stavebního materiálu. Mezi hlavní nevýhody patří nízká přesnost výroby a potřeba u složitých tvarů vzniku a následně odstranění podpěr. [11]

3.3.3 Spékání práškové vrstvy (Powder bed fusion)

Za pomoci přivedené energie dochází během této metody ke spékání, nebo tavení prášku a jeho následnému spojení s předchozí vrstvou. U této technologie se jako zdroj tepla využívá laserový nebo elektronový paprsek. Touto technologií lze vyrábět jak plastové, tak kovové výrobky. Rozdíl spočívá v tom, že pro spékání, respektive tavení kovů je potřeba výkonnějšího laseru, než je tomu u spékání plastového prášku. Dále má tisk plastu tu výhodu, že na rozdíl od kovových výtisků, výrobek nepotřebuje podpěry. [12]

K této technologii se řadí i metoda SLM (selective laser melting-laserové tavení), které se budu v rámci této diplomové práce blíže věnovat.



Obrázek 2 - Schéma metody SLM [13]

3.3.4 Nanášení tryskáním (Material jetting)

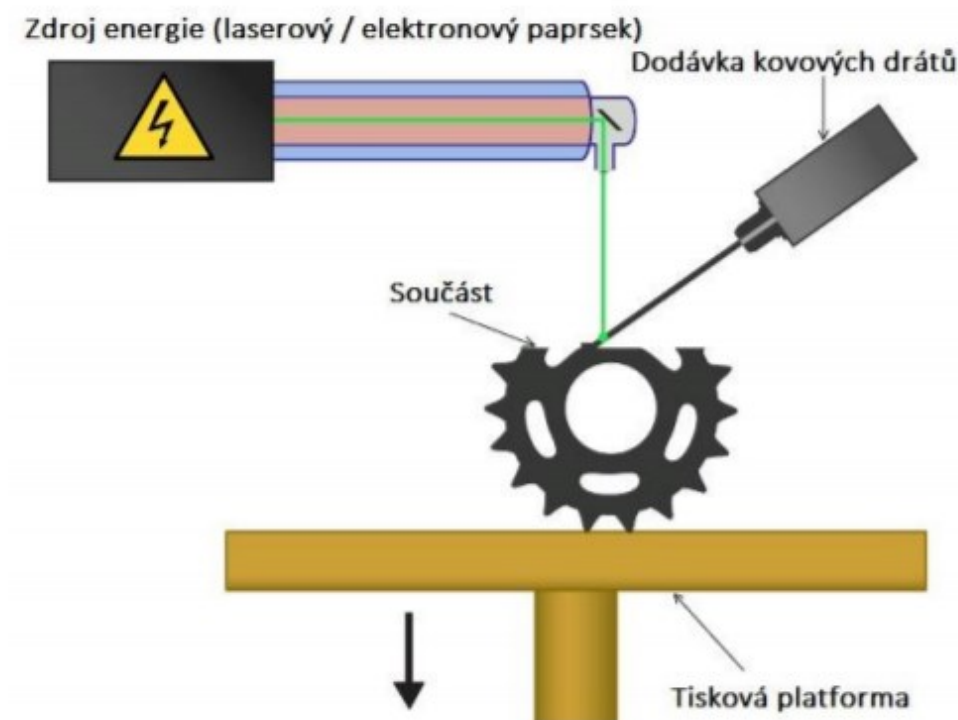
Princip této metody spočívá v nanášení kapiček materiálů, které jsou následně vytvrzovány pomocí UV záření. Výsledný výrobek má dobrý povrch. Samotná technologie je velmi přesná, navíc je možno kombinovat několik druhů materiálu během tisku jednoho výrobku. Nevýhodou je křehkost výsledného produktu a vysoká pořizovací cena tiskáren. Touto technologií se tisknou polymery a vosk. [14]

3.3.5 Přímé energetické nanášení (Direct energy deposition)

Tato technologie stejně jako metoda spékání práškové vrstvy využívá laser nebo elektronový paprsek, jenž nataví základní materiál a dojde posléze k jeho spojení. Součástí stroje je tryska, uložená na pětiosém ramenu. Tato tryska ukládá materiál do požadované polohy a ten je následně pomocí paprsku nataven.

Výhodou je možnost vytvářet velké díly, poměrně rychle. Kovový materiál používaný u této technologie, může být přidáván už k existujícím kovovým částem. Díky tomu se často používá k opravě už používaných součástí.

Naopak nevýhodou je, že po ochlazení je vzniklá textura povrchu drsná. Proto výsledek potřebuje následnou povrchovou úpravu. [15]



Obrázek 3 - Schéma přímého energetického nanášení [15]

3.3.6 Laminace plastů (Sheet lamination)

V rámci této technologie je vyřezána z plastů celá vrstva, jenž je následně přilepená na vrstvu předchozí. Samotný materiál používaný u této technologie je levný, navíc se využívá barevného tisku s kvalitním povrchem. Nevýhodou je, že na rozdíl od jiných aditivních technologií je vznik velkého množství odpadu. [11]

3.3.7 Fotopolymerace (Vat photo-polymerization)

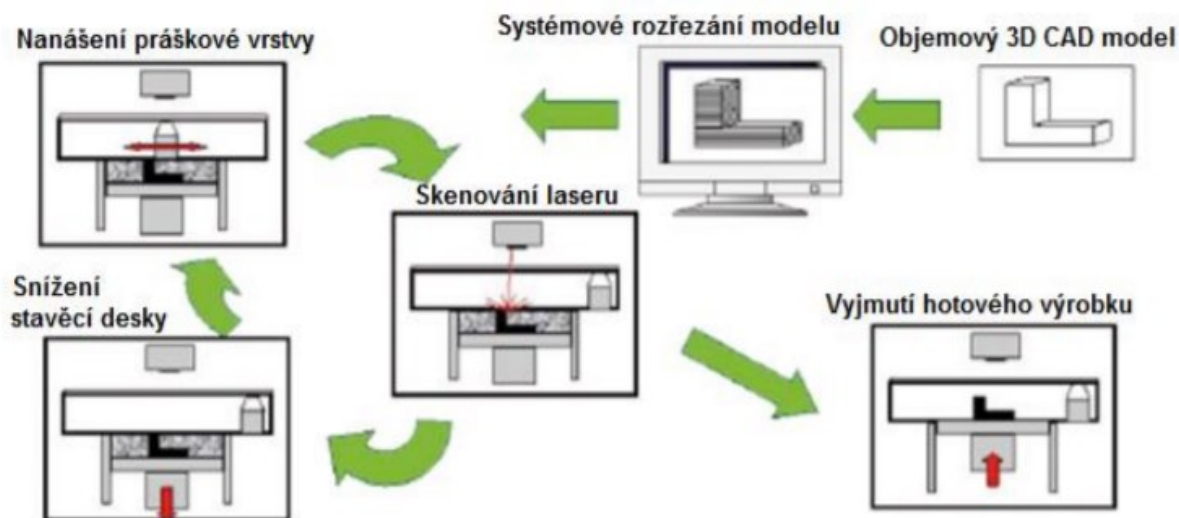
Fotopolymerizace je polymerizace, jenž je aktivovaná pomocí světla. Slouží k vytváření výrobků z pryskyřice. V principu dochází k aktivaci látek obsažených ve výplňové hmotě. Po aktivování dochází k jejich rozpadu, čímž dochází k polymerizační reakci. Ta má za následek vytvrdnutí pryskyřice. Samotný proces probíhá v nádobě obsahující polymer.

Tato technologie je velmi přesná a výsledné díly mají dobrý povrch. Nevýhodou je však nutnost následného vytvrzení modelu, pro zlepšení jeho mechanických vlastností. [16]

4 Metoda SLM

Pod zkratkou SLM se skrývá pojem selektivní laserové tavení, to pracuje na principu, při kterém se pomocí laserového paprsku skenuje práškové pole, CAD dat nahraných do stroje. Před samotným tiskem je potřeba vytvořit za pomoci CAD softwaru 3D model, který se následně pomocí dalšího softwaru, jenž obvykle dodává výrobce stroje, přeformátuje na jednotlivé 2D vrstvy. Jedna vrstva v tomto softwaru znamená jednu vrstvu kovového prášku při samotné výrobě. [2] [17]

Při výrobě je kovový prášek spékán laserovým paprskem na přehřátý substrát, ten musí mít podobné chemické složení jako použitý kovový prášek. Tato prášková směs je na danou pracovní plochu rovnoměrně nanášena v požadované tloušťce, ta se odvíjí od zadaných parametrů a použitého prášku. Tento proces se posléze opakuje, až dojde ke konečnému zhotovení požadovaného výrobku. Vlastnosti takto vzniklého modelu jako je mikrostruktura, či mechanická pevnost nedosahují aktuálně požadavky pro průmyslové použití této technologie. Aby došlo ke zlepšení požadovaných vlastností, využívá se v dnešní době následných dokončovacích operací, jako je leštění, povrchové úpravy, nebo tepelné zpracování. To má za následek nárůst, jak ceny, tak času potřebného k vytvoření modelu. [18]



Obrázek 4 - Schéma postupu při použití technologie SLM [19]

3D tisk metodou SLM probíhá buď ve vakuu, nebo při použití ochranné atmosféry inertního plynu argonu, pokud to situace vyžaduje, lze použít i dusík. Využití inertního plynu má navíc výhodu v tom, že při svém proudění odnáší přebytečný spečený materiál z tavné lázně. [20]

Stavbu vytvářeného modelu metodou SLM může ovlivnit mnoho parametrů, zasahujících do samotné výroby. Ty můžeme rozdělit do tří skupin:

- parametry skenování – jedná se o parametry, které jsou voleny operátorem výroby,
- parametry stroje – tyto parametry jsou závislé na druhu využitého stroje,
- materiálové parametry – jsou závislé na druhu použitého prášku.

Prášek, jenž se během procesu výstavby nevyužije je možné dále používat, což je velkou výhodou metody SLM. Zbylý prášek se nemusí likvidovat a lze ho použít pro další stavbu modelu. Použité prášky v rámci studie byly 12 až 14krát recyklovány a je prokázáno, že u nich nedošlo k žádným výrazným změnám vlastností, ať už v sypké formě, nebo u modelů vytvořených tímto recyklovaným práškem. [21]

Metoda SLM se dále vyznačuje nízkou energetickou náročností a nižší toxicitou výrobního procesu. A to z důvodu, že na rozdíl od konvenčně užívaných výrobních technologií, není nutné díky recyklaci prášku využívat nového materiálu, při jehož samotné výrobě vzniká energetická potřeba. [21] [22]

Nižší toxicita výroby u metody SLM je dána tím, že není potřeba využívat různých mazacích, či chladících kapalin, jako u konvenčních metod obrábění. [22]

Dobu potřebnou pro vytvoření modelu, je možno rozdělit na dvě části. A to čas primární, která zabírá asi 80 % samotné výroby. Je tvořena různými parametry, jenž výsledný čas ovlivňují, jako je rychlost skenování, výkon laseru a šrafovací vzdálenost. Zatím co samotný výkon laseru je limitován strojem, na němž se model vyrábí, zbylé dva zmíněné parametry, tedy rychlost skenování a šrafovací vzdálenost, lze regulovat. Šrafovací vzdálenost je obvykle 0,7násobek průměru laserového paprsku. Primární čas lze popsat jako, interval potřebný k natavení vrstvy prášku za použití laserového paprsku. [22] [23]

Dalším časem je čas vedlejší, jenž představuje součet všech časů, jenž jsou potřebné pro přípravu pracovní komory, pro samotný průběh výroby modelu. Můžeme do něj zahrnout, jak nastavení parametrů stroje, tak nanesení každé vrstvy prášku v průběhu výroby. [22] [23]

4.1 Laser

V procesu SLM se jako nejvhodnější pro přenos tepla jeví laserový paprsek. Jeho výhodou je možnost přenášet velké množství tepelné energie na jeden konkrétní bod. Velikost průměru tohoto bodu, vytvořeného laserem, určuje velikost laserového paprsku. Pomocí určeného softwaru lze tuto velikost různě měnit. [24]

Pokud se operátor rozhodne zmenšit průměr bodu, zvýší tím hustotu energie, dopadající na daný bod, což má za následek lepší pevnost stavby, ale zároveň tím prodlouží dobu potřebnou pro výrobu dílu. [24]

Mezi sledované parametry u metody SLM patří výkon laseru a skenovací rychlost. Zatím co výkon laseru má vliv při jeho zvyšování na možnost tavení při vyšších rychlostech a s tím spojený větší průnik vzniklého tepla do hloubky materiálu. Tak skenovací rychlost při svém zvětšení zkrátí čas potřebný k ohřevu. To má za následek, že se vzniklé teplo minimálně rozptýluje do oblastí mimo část ohříváné taveniny. Výkon laseru a skenovací rychlost na sobě závisí. [24]

Jedním z dalších parametrů, jenž můžeme u laserového paprsku sledovat je jeho intenzita je jeho intenzita I . Ta je definována jak samotným výkonem zvoleného laseru, tak určeným průměrem paprsku. Určuje se dle rovnice:

$$I = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} [W * mm^{-2}], \quad (1)$$

kde P je výkon laseru a d průměr paprsku

Vzhledem k tomu, že lasery u metody SLM mají tzv. gaussovský profil záření je třeba provést výpočet kvality paprsku M^2 . Tato kvalita nám udává, jak moc se laserový paprsek přibližuje k ideálnímu gaussovskému tvaru. K jejímu určení je nejprve potřeba znát parametr paprsku stroje BPP . Ten se určí pomocí rovnice:

$$BPP = \theta_h * r_f = \theta_h * \frac{d}{2}, \quad (2)$$

kde θ_h představuje odchylku úhlu a r_f poloměr zaostření paprsku.

Následně pomocí další rovnice určíme kvalitu paprsku:

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_{Gauss}} = BPP * \frac{\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

Tabulka 2 - Parametry laseru

Parametr laseru	Označení	Jednotka
Výkon laseru	P	W
Velikost laserového paprsku	d	μm
Intenzita	I	$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
Kvalita paprsku	M^2	-
Vlnová délka	λ	Nm
Druh laseru	kontinuální, pulsní	-

V dnešní době lze na trhu sehnat velké množství laseru s rozdílnými způsoby užití. Nejčastěji se však využívají dva druhy zařízení regulující laserový tok. A to zařízení pro kontinuální tok a pro tok pulsní. Druh zvoleného toku určuje množství vyzářené energie. [26]

4.2 Skenování

Pojmem strategie skenování se rozumí dráha laserového paprsku, při tavení kovového prášku v jednotlivých vrstvách. Volba skenovací strategie má zásadní vliv při snižování zbytkových napětí vznikajících z důvodu rychlého ohřátí a následného ochlazení základního materiálu. [27]

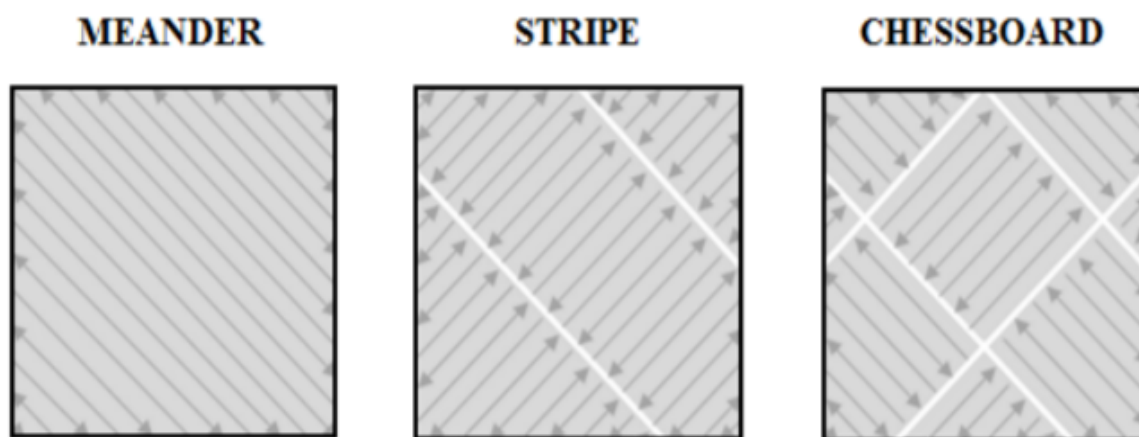
V dnešní době existují tři způsoby skenovací strategie:

- meander,
- stripe,
- chessboard.

Strategie Meander se využívá primárně při výrobě tenkostěnných modelů malých rozměrů, proto aby vzniklé skenovací vektory, jenž mají vliv na vznik zbytkových napětí, nebyly příliš dlouhé. Výhodou této metody je její rychlost skenování. [27] [28]

Strategie Stripe je naopak vhodná pro větší a objemnější modely. Jejím principem je, že dráha laseru je přerušovaná. Tím se skenovací vektory zkracují, což má přímý vliv na vznik zbytkových napětí. Na rozdíl od další metody Chessbord je tato metoda rychlejší. [27] [28]

Strategie Chessbord, v překladu doslova šachovnicová strategie se vyznačuje tím, že laserová dráha je rozdělená do čtvercových polí, každé vedlejší pole je pootočeno o 90°. Tato metoda je speciálně navržena pro snížení zbytkových napětí. Mezi jednotlivými vrstvami se doporučuje pootočit strategii skenování. Doporučeno je o 67°. To má za následek snížení možnosti vzniku pórovitosti. [27] [28]



Obrázek 5 - Strategie skenování [28]

Je třeba brát v potaz že volba skenovací strategie má přímý dopad na parametry výrobního procesu. Proto je třeba pro zvolenou strategii volit i odpovídající sílu laseru a rychlost snímání. [27]

4.3 Práškové materiály

Základním materiálem využívaným u metody SLM je sypký kovový prášek. Samotné vlastnosti jednotlivých prášku zásadně ovlivňují konečnou kvalitu výrobku. Pro vytváření práškové vrstvy jsou nejdůležitější tyto parametry:

- tvar částic,
- velikost částic,
- distribuce částic.

Tyto tři parametry mají vliv na pěchovací hustotu. Je třeba aby jednotlivé částice prášku byly, co nejmenší. Částice však mnohdy nemůžou být moc malé z důvodu bezpečnostních předpisů a tekutosti prášku.

Výrobci prášků používají k přepravě zaplombované barely. Práce s nimi musí probíhat podle stanovených bezpečnostních pravidel, které určuje výrobce pro jednotlivé typy prášků. [29]



Obrázek 6 - Barely pro převoz prášku [30]

Po převozu prášku od výrobce k zákazníkovi je prášek vsypán do zásobníku stroje podle potřeby provozu. Při samotné výrobě je prášek nanášen ve vrstvách na stavěcí platformu, kde je následně pomocí laseru spékán. Pro samotnou výrobu je podstatné, aby takto nanesená vrstva byla co nejvíce homogenní, nedosažení tohoto požadavku může vést ke vzniku nežádoucím vadám, jako je například pórovitost. Tuto část ze zásady ovlivňuje kvalita spěchování prášku v zásobníku. [29]

Podle požadavků na kvalitu a vlastnosti prášku, stejně jako z jakého materiálu má být vytvořen se volí vhodná technologie výroby. Aktuálně se práškový materiál vyrábí čtyřmi způsoby:

- mechanický způsob,
- mechanicko-fyzikální způsob,
- chemický způsob,
- fyzikálně-chemický způsob.

Mezi nejpoužívanější metody lze zařadit:

- rozprašování plynem,
- rozprašování plynem ve vakuu,
- rozprašování pomocí plazmy,
- rozprašování vodou,
- metoda Hydride-hydride. [29]

4.3.1 Metoda rozprašování plynem

Jde o fyzikální metodu, kde pomocí inertního plynu, jenž je přiváděn za vysokého tlaku se roztavený kov rozprašuje na malé částice, jež následně ztuhnou a vytvoří tak částice kovového prášku. [29]

Prášky vyrobené touto metodou se vyznačují kulovitostí svých jednotlivých částic a dobrou hustotou samotného prášku. Mezi další výhody lze zařadit velké množství materiálů, jež jdou tímto způsobem vyrobit. [29]

4.3.2 Metoda rozprašování plynem ve vakuu

Tato metoda, jak už vyplývá z názvu je velice podobná metodě rozprašování plynem s tím rozdílem, že u této proces probíhá ve vakuu, čímž je zajištěna vyšší čistota výsledného prášku. Hodí se pro výroby práškových slitin Ti a Al, u kterých je důležité, aby nedošlo při výrobě ke kontaktu s kyslíkem. [29]

4.3.3 Metoda rozprašování pomocí plazmy

K využití této metody je základní materiál pro výrobu práškem přiváděn buď ve formě drátu nebo namletého prášku. Materiál je přiváděn do rozprašovací komory, kde dochází k jeho roztavení a okamžitému rozprášení za pomoci plazmového hořáku. [30]

4.3.4 Metoda rozprašování vodou

Jedná se o obdobnou metodu jako je metoda rozprašování plynem. Roztavený kov je rozprášen pomocí vody přiváděné za vysokého tlaku. Ta výslednou částici prášku chladí a kalí. Pomocí změny tlaku vody a nastavení trysek lze ovlivnit velikost takto vzniklých zrn. Ty však jsou více nepravidelná než zrna vzniklá při rozprášení plynem. Nevýhodou je potřeba usušení prášku ve vakuu. [30]

4.3.5 Metoda hydride-hydride

Na rozdíl od metody rozprašování vodou, u metody hydride-hydride nedochází k tavení výchozího materiálu. Ten je zpracován mechanickými způsoby jako je drcení nebo frézování. Materiál je při této metodě drcen a následně proséván, aby se takto vzniklý prášek dostal do hydridové komory, kde dojde k odstranění přebytečného vodíku. Takto vyráběný prášek má velmi nepravidelné částice. [30]

4.4 Vady materiálů při využití technologie SLM

Jako o u jiných běžně používaných technologiích výroby i u aditivních technologiích vznikají různé nežádoucí jevy. A stejně jako u jevů vzniklých u konvenčních metod jsou podrobeny výzkumu, aby se zamezilo, co nejvíce jejich výskytu a výroba se zefektivnila.

U metody SLM můžeme sledovat například tyto poruchy:

- porosita,
- rozstřík laseru,
- praskliny,
- klíčová dírka a další.

Porosita je nejčastější vadu vzniklou při výrobě technologií SLM. Vliv na vznik pórovitosti má neúplné roztavení částic taveného prášku. Dalším důvodem vzniku tohoto jevu je působení plynu. Výskyt jednotlivých pórů a jejich velikost má návaznost na zvolené parametry stroje. [31]

Výrobním procesem vzniklá pórovitost může nastat při těchto případech.

Do výrobního procesu je dodáno málo tepelné energie. Pokud dojde k této záležitosti, prášek se nebude dostatečně tavit a pronikání vniklé taveniny do substrátu, respektive do již dříve nanesené vrstvy. To má v konečném důsledku za následek vznik částí nespečeného prášku. [31]

Pokud však bude do výrobního procesu puštěno příliš mnoho tepelné energie, dojde k jevu zvanému klíčová dírka. Zjednodušeně se jedná o vzniklou dutinu obsahující plyn. Důvodem jejího vzniku je odpařování materiálu v hluboké tavní lázni. Tvorba takovéto klíčové dírky obvykle probíhá na hranici vyráběných modelů. [32]

Klíčové dírky jsou při použití metody SLM nežádoucí, a to z důvodu nestability spojování práškové vrstvy. [32]

Další z možných vad vzniklých nevhodným zvolením procesních parametrů je tzv. laserový rozstřík. Na jeho vznik má vliv velká hustota laserové energie. Během laserového rozstříku dochází k rozptýlení taveniny do okolí lázně. To má za následek nedostatečné množství taveniny v místě tavení. Tím vznikají póry. Dalším problémem zapříčiněným laserovým rozstříkem je špatná roztíratelnost prášku, pro další vrstvu. [33]

Při tuhnutí roztaveného kovu u metody SLM může dojít ke vzniku trhlin. Tyto trhliny zapříčiňují vzniklá tahová pnutí.

Mezi plynem způsobenou pórovitost patří například sférické póry. Ty vznikají z důvodu obsahu plynných pórů uvnitř částic použitého prášku. Dalším příkladem plynných pórů je vznik dutin vyplněných inertním plynem používaným při výrobním procesu. [33]

4.5 Mechanické vlastnosti a pórovitost

Snahou při výrobě modelů metodou SLM je dosáhnout vyšší hustoty materiálu, což vede ke snížení výskytu pórů ve vlastní struktuře modelu. Takováto vzniklá struktura prokazuje lepší mechanické vlastnosti. [34]

Pokud má konečná struktura vyráběného modelu nižší hustotu, vykazuje větší pórovitost. Což může mít za následek následnou deformaci tvaru součásti v důsledku koncentrace napěťových stavů. Tato napětí mají za následek vznik únavových trhlin a jejich další šíření. [34]

Jestliže dojde ke vzniku únavové trhliny, dojde díky ní ke spojení pórů ve struktuře modelu a následnému únavovému lomu. [34]

4.6 Omezení při tisku metodou SLM

Jedním ze základních požadavků na výrobky ze strany zákazníka je jejich konečná kvalita. Kvalitu 3D tisku ovlivňují tyto faktory:

- kvalita prášku,
- stroj,
- model,
- operátor. [30]

Kvalita kovového prášku má zásadní vliv na konečné mechanické vlastnosti vyráběných součástí. Za prvotní kvalitu prášku nese odpovědnost jeho výrobce, následně však je potřeba, aby jeho

spotřebitel dbal na jeho řádnou údržbu, jako je jeho přesívání a čištění stroje. Pokud se stroj používá i k tisku prášky jiných materiálů, je potřeba aby nedošlo k jejich smíchání. [30]

Dalším prvkem ovlivňujícím kvalitu tisku je samotný stroj, na němž je model vytvářen. Tento faktor provozovatel nemůže nijak výrazně ovlivnit i přes jeho vysoký vliv na konečnou kvalitu. Jedním z prvků, kde může provozovatel zasáhnout je kvalitní údržba částí stroje, zvláště filtrů. [30]

Model je prvotním bodem, jenž ovlivňuje výslednou kvalitu tisknuté součásti, a to zejména z hlediska povrchové drsnosti a přesnosti rozměrů. Různými postupy už při vytváření modelu lze samotnou metodu učinit efektivnější a vytisknout kvalitnější model. [30]

Co však může ovlivnit kvalitu tisku hlavně je samotný operátor výroby. Zatím co u kovového prášku a stroje může provozovatel ovlivnit konečný výsledek jen minimálně. Tak operátor může výsledek ovlivnit nejvýrazněji, vhodným nastavením jednotlivých parametrů tisku, odpovídajícím pro specifičnost různých dílů. Nejzásadnějšími body, jenž ovlivňují výsledek a operátor výroby je může určovat jsou:

- tloušťka jednotlivých vrstev modelu,
- orientace,
- využití podpěr,
- samotné nastavení parametrů tisku.

Při vhodném nastavení těchto bodů, může operátor výrazně ovlivnit:

- výslednou kvalitu povrchu,
- pórovitost,
- smrštění součástí,
- vnitřní pnutí. [30]

4.7 Tloušťka vrstvy

Pro každý model, jenž je vyráběn je třeba určit tloušťku jednotlivých vrstev. Jejich volba je však značně omezena z důvodu různých vstupních vlivů. Jedním z nejzákladnějších jsou mechanické vlastnosti, jenž by vyráběný model, měl mít shodné s výrobky, které jsou vyráběny konvenčními metodami. [30]

Volba tloušťky vrstvy má vliv na konečný výrobní čas, přesnost rozměrů a v neposlední řadě na kvalitu povrchu finálního výrobku. Tloušťka vrstvy se u povrchové kvality projevuje zvláště tzn.

schodišťovým efektem. Ten lze zmenšením tloušťek jednotlivých vrstev eliminovat, ale nelze dosáhnout jeho úplného odstranění. [30]

4.8 Podpěry

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, podpěry slouží k podepření převislých konců modelu. Pokud jich je třeba, prodlužují dobu tisku a postprocesingu a zvyšují konečnou cenu výroby.

Samotný návrh součásti by měl být vytvářen tak, aby byla potřeba těchto podpěr, co nejmenší. Existuje několik obecně platných pravidel, jenž jejich užití určují. Podpěry není třeba vytvářet, pokud navržený model splňuje tyto podmínky:

- pokud jsou převislé konce menší než 0,3-0,5 mm,
- pokud stěna a stavební platforma svírají úhel větší než 40°,
- pokud je potřeba tisknout otvor kruhového tvaru, který je menší než 8 mm. [30]

Lze využít různých druhů podpěr. Jejich volba závisí na konečné funkci, rozměrech a zvoleném materiálu výrobku.



Obrázek 7 - Podpěry při tisku metodou SLM [35]

4.9 Jedno vektorové dráhy v procesu SLM

Významným činitelem pro kvalitu povrchu a jeho morfologii je hustota laserové energie. Tímto jevem se ve své práci zabýval Dursun a kol. Samotná hustota laserové energie se určuje vztahem:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^2] \quad (4)$$

kde: E – hustota laserové energie [$\text{J} \cdot \text{mm}^2$]

P – výkon laseru [W]

v – skenovací rychlost laseru [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

h – rozteč skenování [mm]

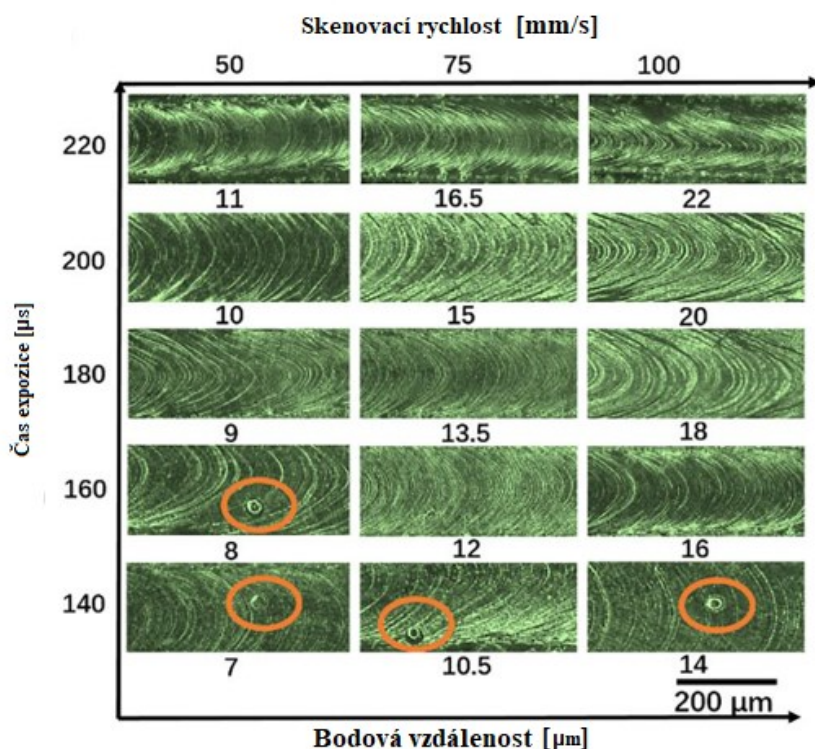
t – tloušťka práškové vrstvy [mm]. [36]

Dursun a kol. ve své práci sledovali vlastnosti jednotlivých drah při měnícím se výkonu laseru a změně rychlosti skenování. [36]

Dle závěrů jejich práce při nižší hustotě laserové energie docházelo k většímu výskytu trhlin a pórovitosti na povrchu. Zatím co při vyšší hustotě laserové energie vykazoval povrch lepší charakteristické vlastnosti. [36]

Jak již bylo zmíněno, hustota energie laseru má významný vliv na kvalitu povrchu a dále i na jeho morfologii. Aby byla relativní hustota stěny vytvářeného modelu vysoká je potřeba, aby morfologie jedno vektorové dráhy byla stejnosměrná, hladká a stabilní. [37]

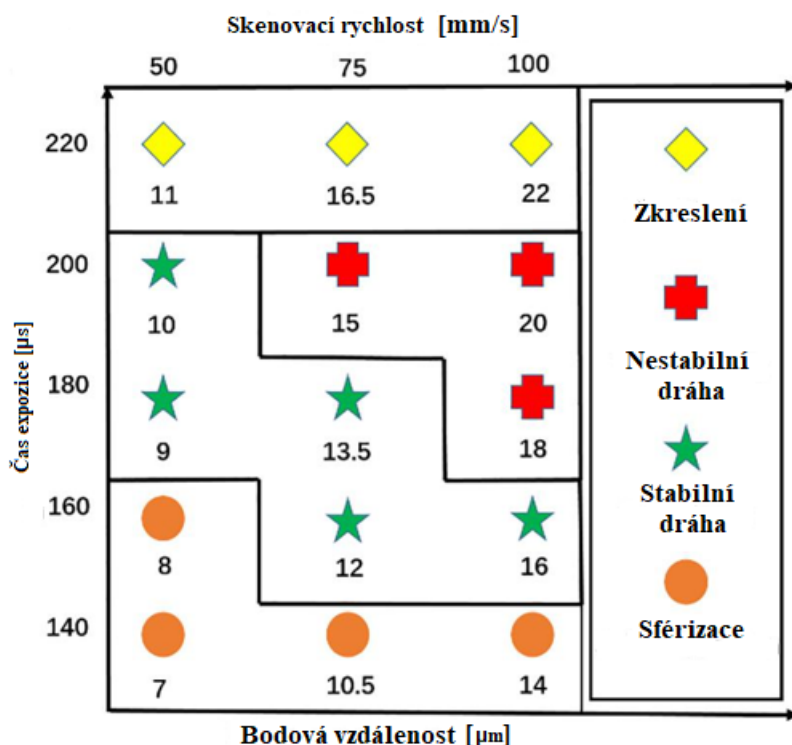
W. Shi a kol. ve svém výzkumu zkoumali morfologii jednotlivých vzorků, vytvořených při určitých parametrech laseru. Výsledné dráhy jsou znázorněny v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** [37]



Obrázek 8 - Vzniklé morfologie jedno vektorových drah při daných parametrech [37]

Z obrázku 6. je patrné, že pokud byla doba expozice 140 μ s, na povrchu docházelo ke vzniku sférizace, jelikož prášek neměl dostatek času k jeho plnému roztavení. [37]

Při zvyšování doby expozice v rozmezí ze 160 na 200 μ s se morfologie povrchu stala stabilní. Naopak při zvýšení času na 220 μ s bylo na vzniklých drahách patrné zkreslení. V Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. jsou přehledně znázorněny jednotlivé vlastnosti drah při daných parametrech. [37]



Obrázek 9 - Rozdělení vlastností jednotlivých vektorových drah při daných parametrech [37]

Jak je z daného obrázku patrné, rozlišujeme čtyři druhy vektorových drah v závislosti na jejich vlastnosti a to:

- dráhy se vznikem sférizace,
- stabilní dráhy,
- nestabilní dráhy,
- zkreslené dráhy. [37]

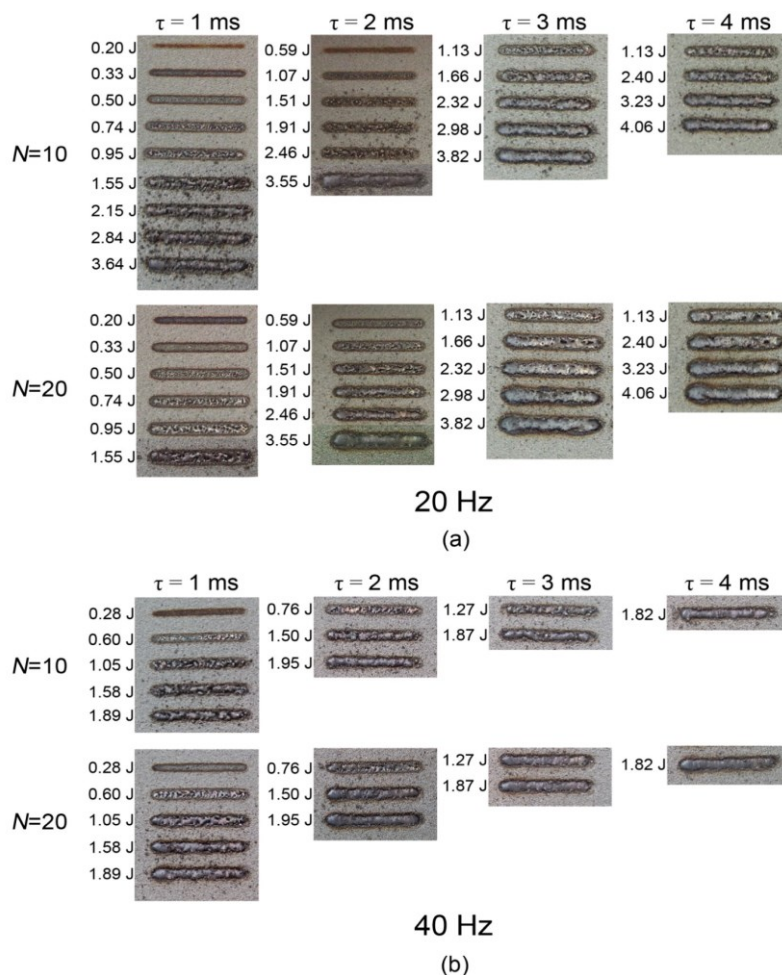
Dále můžeme z obrázku 7 vyčíst, že vysoký čas expozice způsobuje zkreslení, zatím co zvyšující se bodová vzdálenost má vliv na výslednou nestabilitu dráhy. Vznik stabilní dráhy je průvodním jevem vhodně zvolených procesních parametrů. [37]

W. Shi a kol. došli během svého experimentu, prováděného na materiálu 316L při tloušťce vrstvy 250 μm k zjištění, že při správně zvolené kombinaci doby expozice, ideálně v rozmezí mezi 160 a 200 μs a zároveň odpovídající bodové vzdálenosti, lze efektivně ovlivnit morfologii jedno vektorové dráhy. [37]

Dále správně zvolené parametry ovlivňují vznik vad ve struktuře vyráběného modelu, jako jsou netavné deformace, či vznik sférizace. Naopak na vznik rozstříku a mikropórů nemá změna procesních parametrů významný vliv. [37]

Na výzkum jedno vektorových drah vzniklých při metodě SLM se ve své práci zaměřili také Stasič, J. a D. Božič, kteří zkoumali vliv změny parametrů u pulzujícího laserového paprsku na výslednou dráhu. [38]

Ve své práci využili dvě pulzní frekvence f . A to 20 a 40 Hz, při změnách pulzní energie E_p [J], doby trvání pulzu τ [ms] a počtu pulzních skvrn na mm N .



Obrázek 10 Testované vzorky [38]

Ze získaných výsledků zjistili, že při nižší frekvenci je potřeba k získání optimální dráhy doba pulzu mezi 2-4 ms při nejvyšších hodnotách pulzní energie. Delší čas pulzu způsobuje déle trvající tavný bazén, čímž vzniká nepřetržitý tok taveniny a výsledná stopa je pravidelnější. Naopak při krátké době pulzu a nízkých hodnotách energie dochází ke vzniku nestabilních drah, při rostoucí hodnotě energie, při stejné době pulzu docházelo k nežádoucímu rozstříku materiálu. [38]

Experiment ukázal, že při využití vyšší frekvence (40 Hz) jsou výsledné dráhy 1,5 až 2krát užší než dráhy vytvořené při frekvenci 20 Hz. Díky této skutečnosti můžeme dosáhnout větší rozměrové přesnosti. [38]

5 Experimentální část

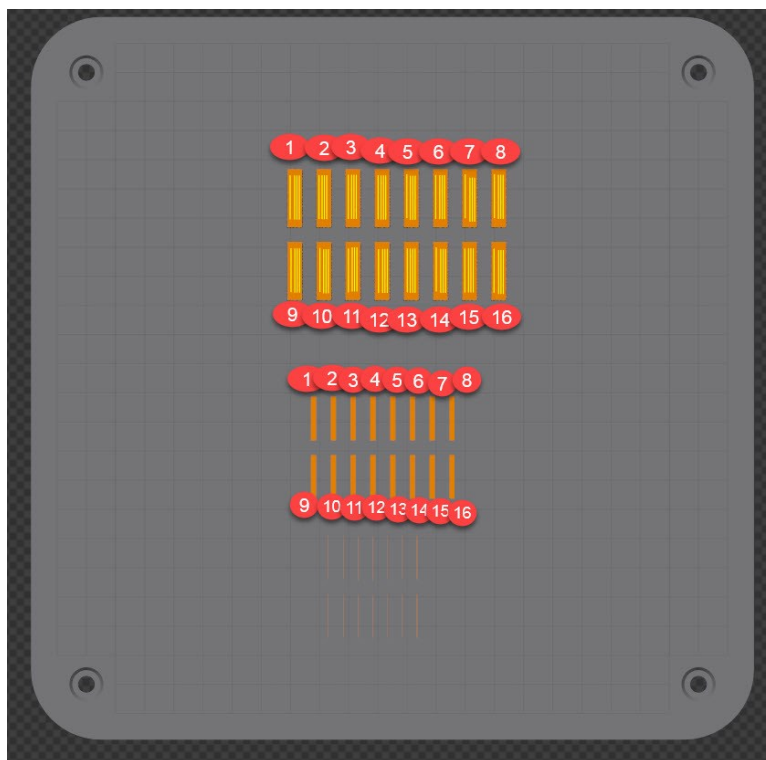
5.1 Popis experimentu

V experimentální části této diplomové práce jsme vytvořily jednovektorové dráhy o délce 20 mm. Jednotlivé dráhy, které byly při tomto experimentu vytvořeny, měly své specifické parametry tisku. Proměnné parametry byly výkon laseru, rychlost skenování a čas expozice, Naopak neměnná zůstala šířka laseru, která byla nastavena na 70 μm a jak již bylo zmíněno délka jednotlivých drah 20 mm.

Samotný experiment byl řízen za pomoci DoE, což znamená Design of Experiment. Při pokusu byl zvolen plný faktoriál a to při navolení dvou faktorů výkonu laseru a rychlosti skenování.

Oba faktory měli 4 úrovně. Výkonu laseru 100, 200, 300, 400 W a rychlost skenování byla 400, 650, 800, 1200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tento experiment by měl ukázat, které ze zvolených parametrů a jejich kombinací nám dávají nejideálnější dráhu, při tisku materiálem 316L.



Obrázek 11 - Rozložení drah během tisku

Tabulka 3 - Vstupní parametry tisku

	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm·s ⁻¹]	Doba expozice [μs]
1	100	400	138
2	100	650	80
3	100	800	63
4	100	1200	38
5	200	400	138
6	200	650	80
7	200	800	63
8	200	1200	38
9	300	400	138
10	300	650	80
11	300	800	63
12	300	1200	38
13	400	400	138
14	400	650	80
15	400	800	63
16	400	1200	38

Zařízení Renishaw AM400 na němž byl experiment vykonán využívá pulzní paprsek, u nějž nejde jasně definovat parametr rychlosti skenování. Co lze v sliceru QuantAM, jenž je doporučen výrobcem zařízení jako vhodný program při využití jejich 3D tiskárny, nastavit je čas expozice.

Ten lze určit podle vzorce pro výpočet efektivní skenovací rychlosti.

$$v = \frac{60}{ET+12} * 10^3 [mm \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

kde $v [mm \cdot s^{-1}]$ představuje efektivní skenovací rychlost a $ET [\mu s]$ čas expozice. Po úpravě této rovnice dostaneme vzorec pro výpočet času expozice:

$$ET = \frac{60*10^3}{v} - 12 [\mu s] \quad (6)$$

Pomocí uvedeného **vzorce 6** byl vypočten čas expozice pro jednotlivé zvolené rychlosti skenování. Pro názorný popis výpočtu byla zvolena skenovací rychlost $400 mm \cdot s^{-1}$.

$$ET = \frac{60*10^3}{400} - 12 \quad (7)$$

$$ET = 138 \mu s$$

Časy expozic pro jednotlivé skenovací rychlosti jsou viditelné v **tabulce 3**.

5.2 Zařízení pro tisk

Jak již bylo zmíněno experimentální vzorky byly vytištěny na zařízení Renishaw AM400. Jedná se o zařízení vyrobené ve Velké Británii. Výhodou u tohoto modelu je větší filtr. Díky čemuž může obsluha manipulovat práškem pomocí rukavic, které do značné míry omezí kontakt prášku, jak se samotnou obsluhou stroje, tak s prostředím, znečištěným výrobním procesem. [39]

Součástí zařízení je násypka s uzávěry ventilu. Tato násypka umožňuje, aby mohl být kovový prášek přidáván i během samotného průběhu tisku. Díky tomu, že tuto násypku lze vyměnit za sekundární násypku za účelem výměny materiálu, může obsluha jednoduše na tomto stroji měnit různé prášky. [39]

Dále je zařízení vybaveno řídícím systémem optiky, systémem pro ochranu okna. Laser dosahuje vlnové délky $1070 nm$, který dokáže vyprodukovat paprsek o průměru $70 nm$. [39]

Jelikož samotný tiskový výrobní proces probíhá ve vakuovém prostředí, využívá se během daného procesu inertního plynu. U modelu AM400 od společnosti Renishaw se používá čistý argon. Pomocí tohoto inertního plynu lze dosáhnout dostatečné čistoty pracovního prostředí pro tisk a obsah kyslíku dokáže udržet pod hranicí $500 ppm$. Výhodou tohoto modelu je, že při samotném tisku stačí jen malé množství argonu pro naplnění tiskového prostoru, i při provozování tiskárny. [39]

Tiskárna AM400 je externě dovybavena různými potřebnými součástmi. Mezi ně patří:

- chlazení,
- odvlhčovač vzduchu,
- nádoby pro možnost manipulace s kovovým práškem,

- zařízení k prosetí použitého prášku,
- čidlo pro kontrolu úniku inertního plynu ze zařízení. [39]



Obrázek 12 - Zařízení Renishaw AM400 [39]

Tabulka 4 - Parametry 3D tiskárny Renishaw AM400

Sledovaný parametr zařízení	Hodnota	Jednotka
Rychlost tisku	Až 2000	$mm.s^{-1}$
Posuv	7000	$mm.s^{-1}$
Maximální výkon laseru	400	W
Průměr paprsku laseru	70	μm
Geometrická přesnost tisku	50	μm

Velikost tiskové plochy	250x250x300	mm
Využívaný materiál	316L, AlSi10Mg, Ti6Al4V, CoCr, In625	-

5.3 Skenování povrchu vzorků a charakteristika měřicího zařízení

K vytvoření snímků jednotlivých drah, aby mohlo dojít k jejich porovnání při změně parametrů tisku se využilo skenování povrchu pomocí zařízení Alicona Infinite Focus G5.

Toto mikroskopické optické 3D zařízení slouží k bezdotykovému snímání povrchové struktury jednotlivých vzorků. Vytvoří se snímky, které slouží k vyhodnocení a zjištění požadovaných charakteristik povrchu. Alicona Infinite Focus G5 se pyšní vysokou přesností a kvalitou vzniklých snímků a lze díky němu skenovat a následně analyzovat povrch v podstatě jakéhokoliv materiálu. [40]

Velkou výhodou tohoto zařízení je možnost pomocí zhotovených snímků analyzovat parametry jak plošné drsnosti, tak profilové, díky tomu odpadá nutnost využít dotykové měřicí přístroje. [40]

Přístroj Alicona Infinite Focus G5 je vybaven otočnou hlavicí, v níž je zasazeno šest objektivů s různými stupni přiblížení. Samotný snímek se však provádí vždy jen jedním objektivem. Tato otočná hlavička je pak umístěná na posuvné jednotce, která se pohybuje na portálu stroje, což umožňuje nastavení vhodné vzdálenosti mezi objektivem a snímaným povrchem. [40]



Obrázek 13 - Zařízení Alicona Infinite Focus G5 [40]

5.4 Prášek

Jak již bylo zmíněno v předchozí části této diplomové práce je důležitým faktorem pro výsledný výtisk i kvalita kovového prášku. S tím se váže i vysoká potřeba, aby nanášený prášek vytvořil jednolitou vrstvu, požadované šířky, na tiskové desce.

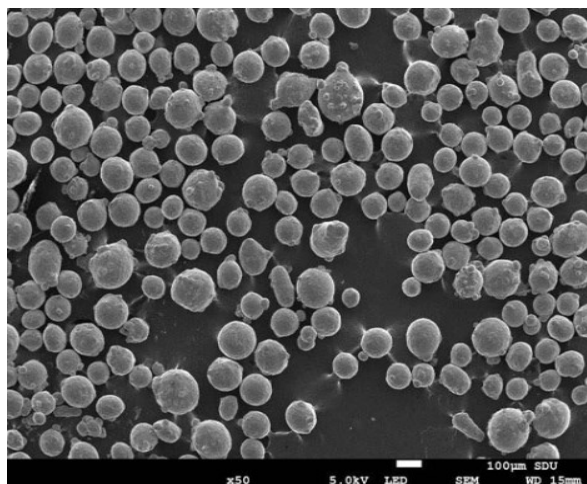
Pro tento experiment byl zvolen kovový prášek 316L. Tento prášek se řadí mezi nemagnetické austenitické oceli. S dobrou odolností proti korozi. Jedná se o ocel s obsahem chromu jako legovacího prvku. Dalšími prvky obsaženými v kovovém prášku 316L jsou nikl, molybden a dalších prvků. Tento prášek byl vyroben pomocí plynové atomizace, jenž byla popsána v kapitole 4.3.1. [41]

Mezi další z vlastností tohoto prášku patří dobrá svařitelnost a díky nízkému obsahu uhlíku nedochází k tzv. senzibilizaci, jenž charakterizuje srážení karbidů na hranici jednotlivých zrn. Velkou předností je dobrá pevnost v tahu při vysokých teplotách, jeho houževnatost a je velmi dobře leštitelný. [41]

V průmyslu slouží převážně k výrobě forem ke vstřikování plastů, pro výrobu chirurgických nástrojů, kuchyňského vybavení, jako je nádobí a příbory. Významné je i díky jeho dobré korozivzdornosti užití pro námořní průmysl, šrouby a obecné využití ve strojírenském průmyslu. [41]



Obrázek 14 - Prášek 316L [42]



Obrázek 15 - SEM prášku 316L, zvětšení x50 [42]

Tabulka 5 - Fyzikální vlastnosti materiálu 316L

Vlastnost materiálu	Hodnota	Jednotky
Hustota	7999	$kg \cdot m^{-3}$
Bod tání	1371-1399	$^{\circ}C$
Tepelná vodivost	16,2	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Teplotní součinitel elektrického odporu	$16 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}

Tabulka 6 - Chemické vlastnosti materiálu 316L

Prvek	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
Množství [%]	Kolísá	18	14	3	< 2	< 1	< 0,1	< 0,1	< 0,045	< 0,03	< 0,03

5.5 Tisk vzorků a jejich hodnocení

Samotný experiment probíhal v Centru 3D tisku Protolab spadající pod Katedru obrábění, montáže a strojírenské metrologie Fakulty strojní VŠB-Technické univerzity Ostrava.

Jak již bylo zmíněno v předešlých podkapitolách experimentální části této diplomové práce, nejprve se v sliceru QuantAM nastavili vybrané parametry pro jednotlivé zkoumané dráhy.

Poté proběhl samotný tisk dle návrhu a nastavení na zařízení Renishaw AM400. Skenovací dráhy byly vytvořeny přímo na tiskovou podložku, na kterou byla nanесena jedna vrstva prášku ($50\text{ }\mu\text{m}$) a poté se celá tisková podložka vložila pod mikroskopické zařízení, které provedlo optické vyhodnocení. Nebylo zapotřebí nějak zvlášť upravovat povrch např. pomocí leptání, jelikož dráhy byly snadno viditelné. Dráhy byly snímány pomocí skenovacího zařízení Alicona Infinite Focus G5. Pro nasnímání a následné vyhodnocení vzniklých jedno vektorových drah jsme zvolili 20násobné zvětšení.

5.5.1 Výkon laseru 100 W

$400\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

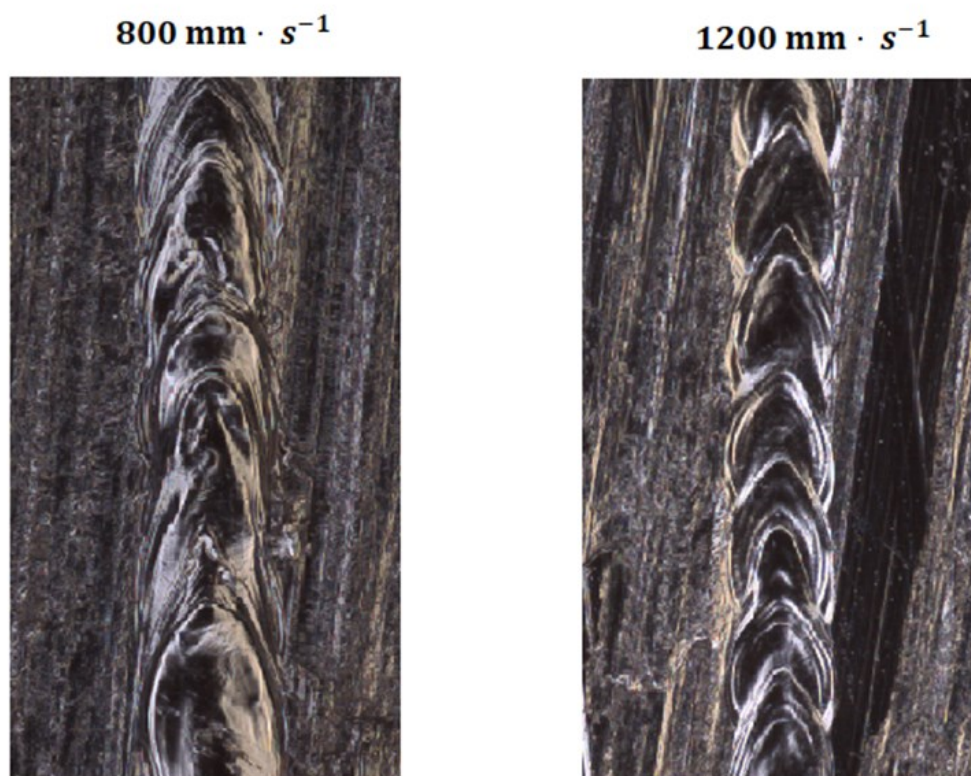


$650\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$



Obrázek 16 - Dráha: $P = 100\text{ W}$, $v = 400\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

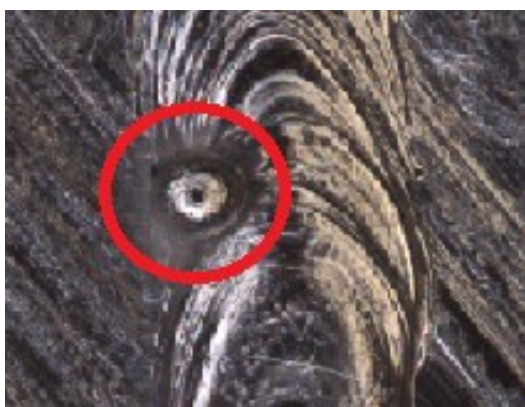
a $P = 100\text{ W}$, $v = 650\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20



Obrázek 17 - Dráha: $P = 100 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 100 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

Na **obrázcích 16 a 17** jsou umístěné dráhy, které byly vytvořeny pulzním laserem při nastavení výkonu laseru 100 W a zároveň měnící se skenovací rychlosti, respektive času expozice.

Na **obrázku 18** můžeme vidět vznik sférizace. Jedná se o vadu vzniklou při kombinaci nízkého výkonu laseru a velmi nízké rychlosti skenování. Jak již bylo zmíněno v teoretické části této diplomové práce má skenovací rychlost vliv na čas potřebný k ohřevu materiálu. A právě kombinace těchto faktorů způsobila, že se prášek nedostatečně roztavil a došlo ke vzniku již zmíněné sférizace.



Obrázek 18 - Vzniklá sférizace na dráze: $P = 100 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

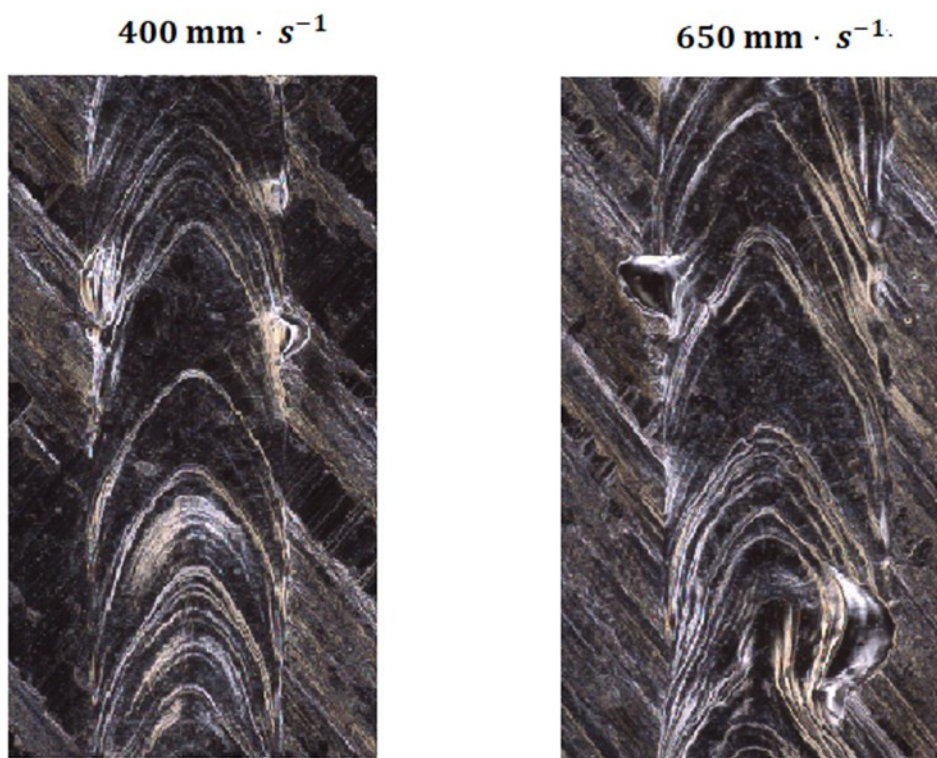
Na dalších snímcích se výše popsaná vada díky zvýšené skenovací rychlosti neobjevuje, naopak je patrná nesjednocenost vzniklých drah, a to právě z důvodu kombinace nízkého výkonu a zvyšujících se rychlostí.

Jak bylo opět zmíněno v předchozí práci má velký vliv na vzniklou dráhu hustota laserové energie. U uvedených snímků zůstal výkon laseru, rozteč skenování i tloušťka práškové vrstvy na stejných hodnotách a zároveň se měnila skenovací rychlost. Díky tomu se při vyšší skenovací rychlosti zmenšovala hustota laserové energie.

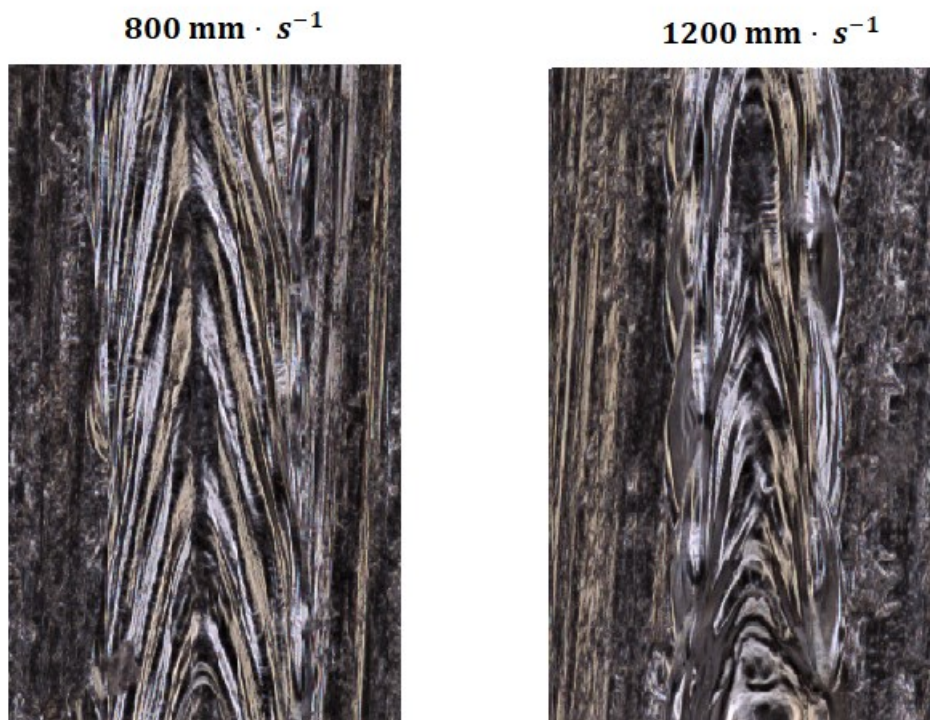
Tato skutečnost měla vliv na vzniklou nesjednocenost drah a jak je na obrázcích patrné s vyšší skenovací rychlostí a menší laserovou hustotou se tato nesjednocenost drah zvětšovala.

Ve výsledku je patrné, že při jakákoliv kombinace různých skenovacích rychlostí s nejnižším výkonem laseru, zvoleným pro tento experiment, nedojde k vytvoření sjednocené stabilní dráhy.

5.5.2 Výkon laseru 200 W



Obrázek 19 - Dráha: $P = 200 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení $\times 20$



Obrázek 20 - Dráha: $P = 200 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 200 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

Další zvolené snímky kombinují výkon laseru 200 W s měnící se skenovací rychlostí.

Díky vyššímu výkonu laseru se ani při skenovací rychlosti $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ neprojevila, tak jako u první série sférizace. Naopak tato dráha dosáhla ideálního stavu, kdy je patrná sjednocenost, i stabilita celé dráhy. Navíc dráha vzniklá pomocí této kombinace je dostatečně vyhlazená.

Po zvýšení skenovací rychlosti na $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je dráha stabilní a vyhlazená, až na omezený úsek, ve kterém se projevila nestabilita. Tato nestabilita je zajímavá z důvodu, že se vyskytla v podstatě nejideálnější kombinaci vstupních parametrů udávaných výrobcem zařízení.



Obrázek 21 - Vzniklá nestabilita na dráze: $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

Zatím co předchozí kombinace při výkonu laseru 200 W vykazovaly vyhlazenou texturu při zvýšení skenovací rychlosti na $800\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ dráha sice splňuje požadavek na celistvost a sjednocenost, ale zároveň není tato dráha vyhlazená.

Po dalším zvýšení skenovací rychlosti na $1200\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ dráha nejenže dále vykazuje nevyhlazenou texturu, ale ztratila i svou stabilitu, což je způsobeno právě zvyšující se skenovací rychlostí, která má za následek snížení pracovní teploty a tím vzniklou nestabilitu kapilární taveniny.

5.5.3 Výkon laseru 300 W

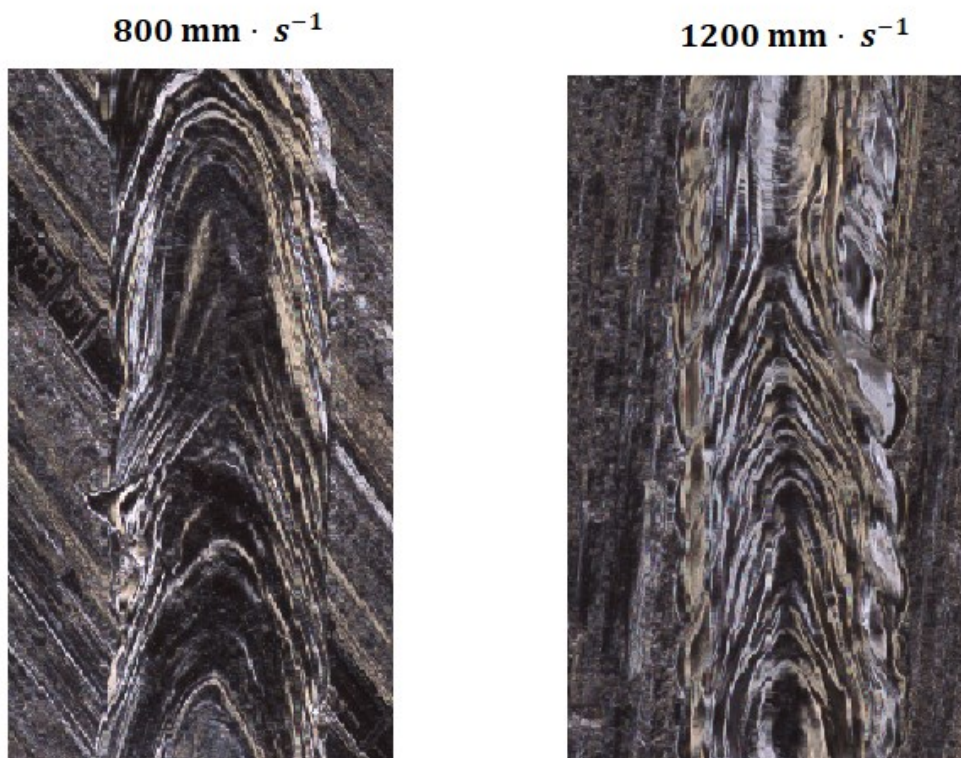
$400\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$



$650\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$



Obrázek 22 - Dráha: $P = 300\text{ W}$, $v = 400\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 300\text{ W}$, $v = 650\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení $\times 20$



Obrázek 23 - Dráha: $P = 300 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 300 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

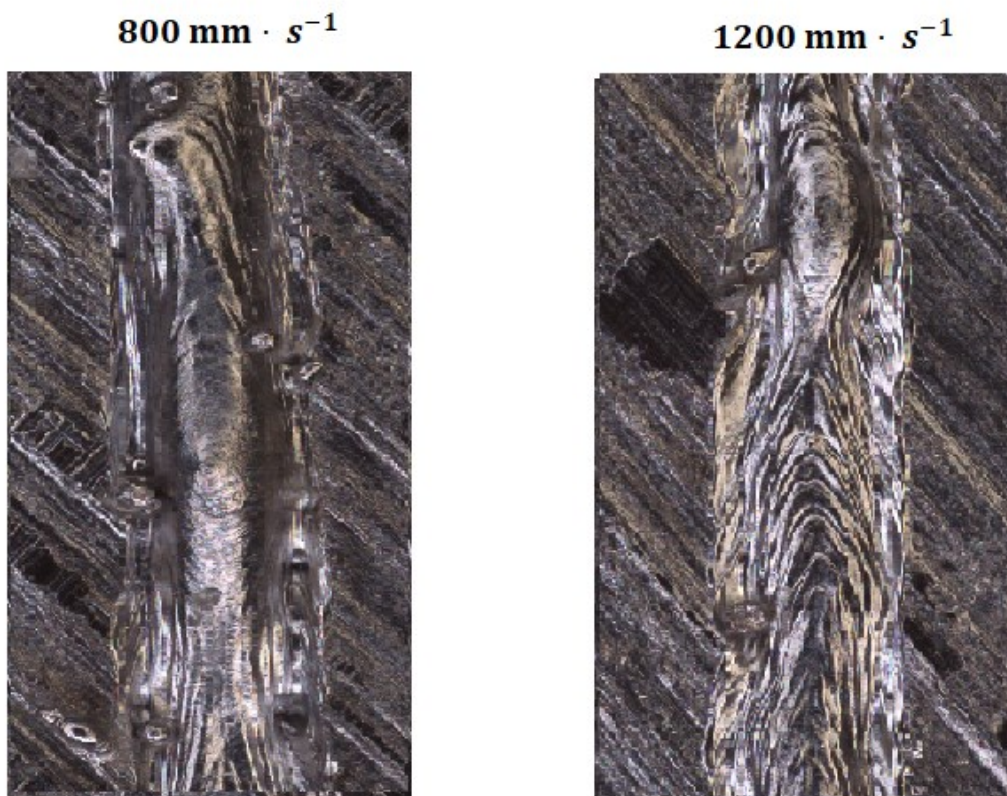
Při využití výkonu laseru o hodnotě 300 W v kombinaci s nízkou skenovací rychlostí vzniká dráha, která vykazuje hladký povrch a zároveň je i poměrně stabilní.

Obrázky 22 a 23 ukazují postupně rostoucí nestabilitu. Rozdíl v daných dráhách je patrný ve vyhlazení výsledné textury, dráha využívající v kombinaci skenovací rychlost o hodnotě $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ má svou texturu více vyhlazenou, což je zapříčiněno vyšším časem expozice.

Při nejvyšší rychlosti skenování je jako u předchozího výkonu laseru patrná výrazná nestabilita dráhy v kombinaci s nevyhlazenou texturou, což je zapříčiněno právě vysokou skenovací rychlostí a tím už vzniklou nestabilní taveninou.

5.5.4 Výkon laseru 400 W

 $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Obrázek 24 - Dráha: $P = 400 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 400 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20



Obrázek 25 - Dráha: $P = 400 \text{ W}$, $v = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $P = 400 \text{ W}$, $v = 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení x20

Nejvyšší zvolený výkon laseru v kombinaci s nižší rychlostí skenování vytvořil stabilní dráhu. Zatímco u využití nejnižší skenovací rychlosti vzniklá dráha má patrnou zvýšenou drsnost povrchu, zvolený výkon v kombinaci se skenovací rychlostí $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ se prezentuje jako stabilní s jasně vyhlazenou texturou.

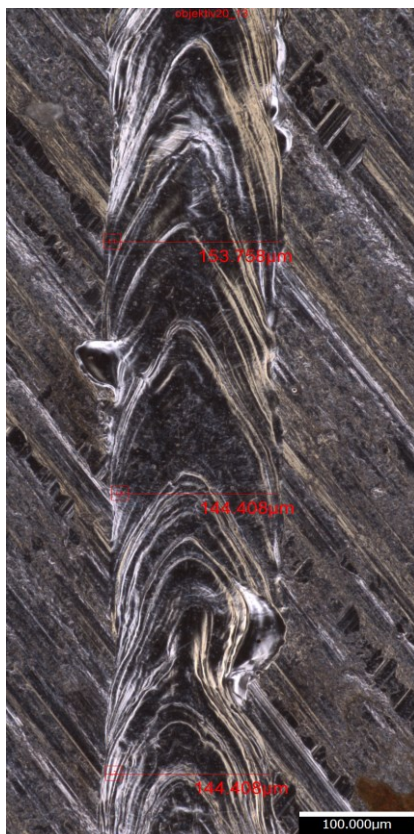
Naopak využití vyšších skenovacích rychlostí, jak je vidět na **obrázku 25** vede ke vzniku nestability a nevyhlazení dráhy, stejně jako u využití těchto skenovacích rychlostí v kombinaci s výkonem laseru o hodnotě 300 W .

5.5.5 Vliv šířky dráhy na stabilitu

Po vytvoření snímků pomocí zařízení Alicona Infinite Focus G5 byla na jednotlivých dráhách naměřena na třech místech jejich šířka. Z těchto naměřených hodnot se následně vypočítat výběrový průměr šířky dráhy a směrodatná odchylka. Vypočítané hodnoty pro dráhy různých kombinací vstupních parametrů jsou uvedeny v **tabulce 7**. K vypočítaným hodnotám ve zmíněné tabulce, byly přiřazeny zjištěné vlastnosti, jednotlivých drah. Jmenovitě jde o sjednocenost a stabilitu dráhy.

Tabulka 7 - Šířka a vlastnosti laserových drah

	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm·s ⁻¹]	Šířka dráhy [μm]	Odchylka [μm]	Sjednocená dráha	Stabilní dráha
1	100	400	103,602	± 2,867	✓	X
2	100	650	88,767	± 0,989	X	X
3	100	800	74,656	± 1,492	X	X
4	100	1200	56,559	± 1,092	X	X
5	200	400	153,542	± 1,968	✓	✓
6	200	650	150,858	± 5,266	✓	✓
7	200	800	117,632	± 3,280	✓	✓
8	200	1200	85,573	± 0,327	✓	X
9	300	400	261,805	± 3,887	✓	✓
10	300	650	213,669	± 1,979	✓	X
11	300	800	163,801	± 3,334	✓	X
12	300	1200	123,049	± 3,135	✓	X
13	400	400	238,371	± 2,778	✓	✓
14	400	650	275,892	± 2,320	✓	✓
15	400	800	144,862	± 5,246	✓	X
16	400	1200	146,833	± 3,959	✓	X



Obrázek 26 - Naměřené šířky na dráze: $P = 200 \text{ W}$, $v = 650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; zvětšení $\times 20$

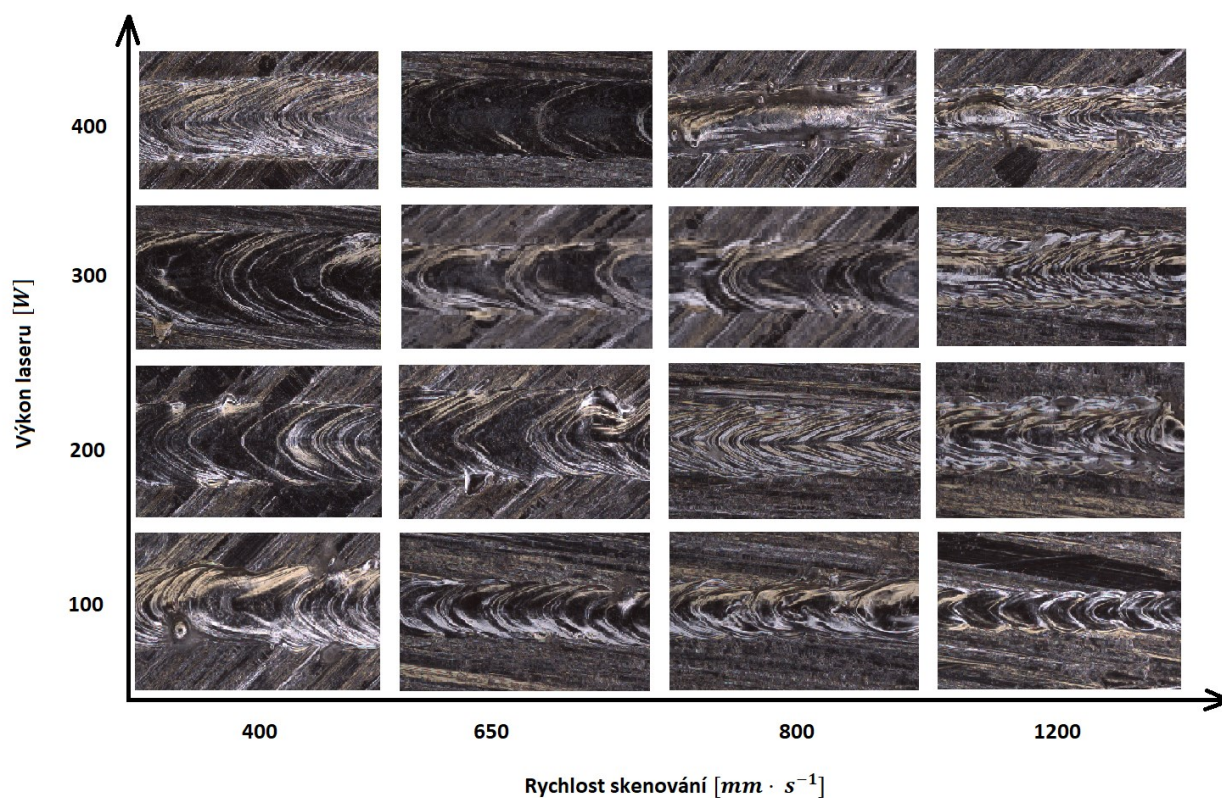
Z tabulky je patrné, že dráhy vykazující nesjednocenost se pohybují v naměřeném rozmezí mezi 55 až 89 μm . Tyto dráhy byly vytvořeny za pomoci nízkého výkonu laseru a vyšší skenovací rychlosti.

Sjednocení a zároveň nestabilitu vykazují nejčastěji laserové dráhy v rozmezí mezi 90 až 150 μm .

Naopak stabilní dráhy se sjednocenou strukturou mají nejčastěji naměřenou šířku dráhy mezi 150-275 μm .

Oba vstupní faktory mají výrazný vliv na šířku výsledné dráhy. Šířka dráhy je rostoucí v závislosti na zvyšování výkonu laseru. Při zvýšení skenovací rychlosti u určitého výkonu laseru dochází z pravidla k zeštíhlení vytvořené dráhy.

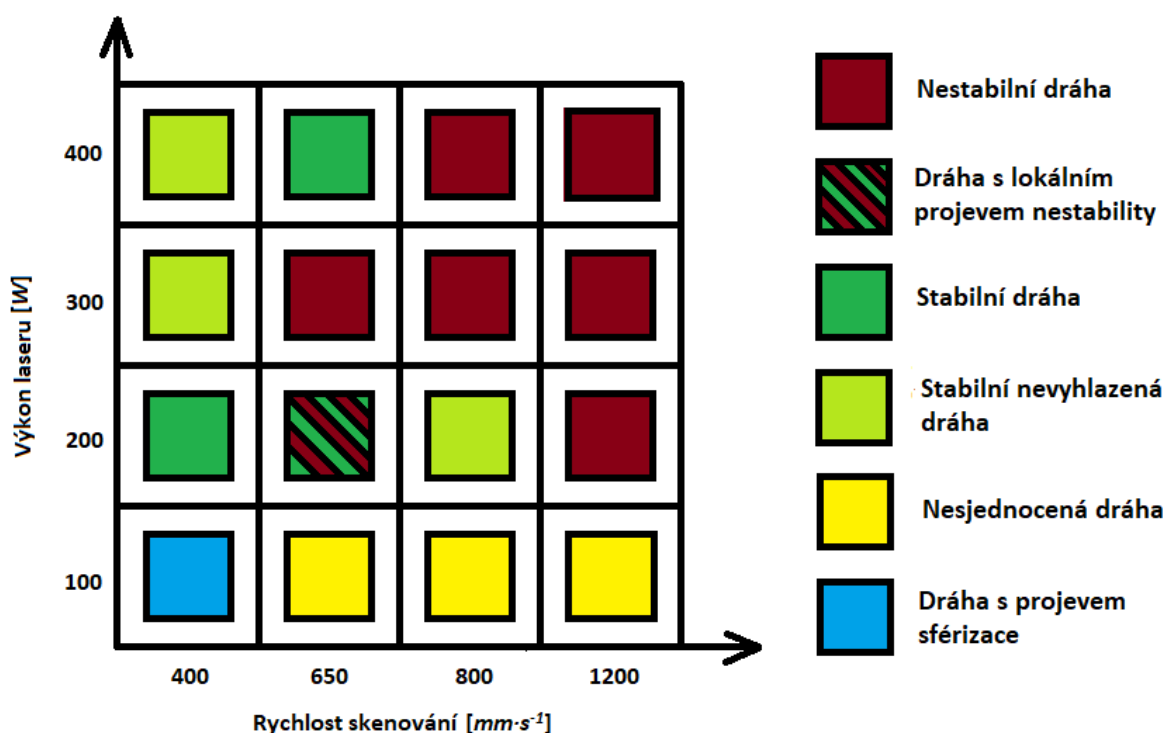
6 Diskuze a výsledky



Obrázek 27 - Dráhy vytvořené během experimentu, zvětšení x20

Při experimentu bylo vytvořeno 16 drah o určitých parametrech, tyto vzniklé dráhy pak byly nasnímány. Dráhy na těchto snímcích byly následně hodnoceny z hlediska jejich spojitosti a stability a byla hledána ideální kombinace vstupních parametrů.

Ze zjištěných výsledků lze říct, že pro tvar a celkovou strukturu dráhy má správná volba vstupních parametrů výrazný vliv. Změna jakéhokoliv parametru mění strukturální vlastnosti vznikající dráhy, jak je vidět na **obrázku 27**.



Obrázek 28 - Rozdělení drah podle vlastností

Ze získaných poznatků je patrné, že jakákoliv změna skenovací rychlosti v kombinaci s výkonem laseru o hodnotě 100 W nevede k vytvoření vhodné dráhy. Pokud je skenovací rychlost malá, nedochází k dostatečnému natavení prášku a následně k jeho nedostatečnému zpracování. Se zvyšující se rychlostí skenování se sice tento nežádoucí vliv ztrácí, ale vzniká značně nesjednocená dráha. Platí přitom přímá úměra, čím vyšší je skenovací rychlost, tím je toto nesjednocení dráhy větší.

Z hlediska výkonu laseru se jeví jako nejlepší varianta jeho velikost 200 W, což odpovídá doporučení výrobce zařízení, na němž byl experiment proveden. Dráha kombinující zmíněný výkon laseru s nejnižší zvolenou skenovací rychlostí je dostatečně sjednocená, vykazuje dobrou stabilitu a vyhlazenou texturu. Všechny tyto parametry jsou patrné i u vyšší skenovací rychlosti $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Jedná se o kombinaci výkonu laseru a skenovací rychlosti, která je doporučena výrobcem. Tato dráha vykazuje po většinu své délky dobré sledované vlastnosti, až na drobnou lokální nestabilitu. Při dalším zvýšení skenovací rychlosti na $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ si dráha ponechává svou stabilní a sjednocenou formu, vyšší skenovací rychlost, však způsobuje zvrásnění povrchu dráhy. Což je nežádoucí jev. Jakmile je zvolený výkon laseru zkombinován s nejvyšší skenovací rychlostí, pokračuje projev zvrásnění a zároveň dráha ztrácí svou stabilitu.

U nastaveného výkonu laseru na hodnotě 300 W nemá žádná ze sledovaných drah žádané kvality, nejlepší se jeví kombinace s nejnižší zvolenou skenovací rychlostí, kdy vzniklá dráha drží

požadovanou stabilitu, ale na rozdíl od dráhy kombinující danou rychlost s výkonem 200 W, je patrné horší vyhlazení dráhy. Zvýšení skenovací rychlosti vede k nárustu nestability drah.

Výkon 400 W je nejvyšší možný výkon laseru pro zvolenou tiskárnu. Při využití této hodnoty a její kombinací s nejnižší zvolenou skenovací rychlosti, získáme stabilní dráhu s výrazným zvrásněním, které se při dané skenovací rychlosti a zvyšujícím se výkonu stává zřetelnějším. Naopak při zvýšení na $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je dráha stabilní a vyhlazená. Těchto vlastností tato dráha dosahuje i přesto, že zatím co zvolená skenovací rychlost odpovídá doporučení výrobce, tak výkon laseru je v tomto případě dvojnásobný.

Na **obrázku 28** je vidět, že výše skenovací rychlosti má výrazný vliv na stabilitu dráhy. Ty dráhy, které vznikly při vyšších skenovacích rychlostech mají tendenci k nestabilitě, zatím co dráhy vzniklé v kombinaci s nižší skenovací rychlostí jsou většinou stabilní.

Pokud pomineme lehkou lokální nestabilitu u kombinace 200 W a $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ vykazují žádoucí vlastností, tedy sjednocení, stabilitu a vyhlazení tři zkoumané dráhy uvedené v **Tabulce 8**.

Tabulka 8 - Dráhy s ideálními vlastnostmi

Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm·s ⁻¹]	Šířka dráhy [μm]	Odchylka [μm]
200	400	153,542	± 1,968
200	650	150,858	± 5,266
400	650	275,892	± 2,320

Další sledovanou částí tohoto experimentu byly šířky jednotlivých drah. Většina stabilních drah se pohybovala v rozmezí jejich šířky 150-276 μm. V těchto hodnotách se pohybují i tři nejlepší získané dráhy. Z uvedené tabulky je patrné, že výrazný vliv na růst šířky má výkon laseru. Z porovnání šířek všech vytvořených drah v tomto experimentu lze vyčíst, že širší dráhy jsou výrazně častěji stabilní.

Ze získaných poznatků lze vypořádat, že výrobcem doporučený výkon laseru 200 W, lze považovat za optimální pro stavbu dráhy, a to při zvolení doporučené hodnoty rychlosti skenování $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo i v kombinaci s nižší rychlostí $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Dráhy získané kombinací těchto parametrů, vykazují značnou podobnost, kromě jejich stability a vyhlazení i v jejich výsledné šířce.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo pomocí experimentu ověřit a určit ideální vstupní parametry pro stavbu dráhy, vzniklé při 3D tisku pomocí technologie SLM. V teoretické části diplomové práce byly shrnuty aktuální poznatky o výše zmíněné technologii, jednotlivých vstupních parametrech a provedeném zkoumání laserových drah, které byly potřebné k pochopení dané problematiky pro provedení experimentu.

Během experimentu bylo vytvořeno 16 vzorků dlouhých 20 mm kombinujících zvolené hodnoty zvolených parametrů. Jmenovitě šlo o výkon laseru (100 W, 200 W, 300 W a 400 W) a skenovací rychlost ($400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$). Vzorky kombinující různé vstupní parametry byly následně pomocí optického mikroskopu nasnímány a analyzovány. Zároveň byly na snímcích naměřeny šířky jednotlivých drah.

Postupným zkoumáním jednotlivých snímků byly určeny kombinace parametrů, které vykazovaly požadovanou kvalitu sledovaných vlastností, celistvost, stabilita a vyhlazení dráhy. Bylo zjištěno, že nejstabilněji se chovají dráhy při nastavení výkonu laseru na 200 W, což odpovídá doporučení výrobce zařízení. Zároveň bylo zjištěno, že při využití nižší rychlosti skenování dosahují dráhy lepší stability. Naopak vyšší rychlost vede k nestabilitě, což se projevilo zejména při využití nejvyšší zvolené hodnoty tedy $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Jako nejméně vhodný výkon laseru se ukazuje nejnižší zvolená hodnota tedy 100 W. Dráhy vytvořené při tomto výkonu vykazovaly sníženou celistvost, která se se zvyšující skenovací rychlostí snižovala. V kombinaci s nejnižší skenovací rychlostí, byla výsledná dráha celistvější, ale začala se projevovat tzv. sférizace. Tedy nedostatečné natavení prášku.

Při zkoumání šířky jednotlivých drah bylo zjištěno, že stabilnější dráhy se častěji vyskytují v rozmezí 150-276 μm . Dráhy s nižší šířkou mají větší tendence k nestabilitě.

Přínos diplomové práce spočívá v tom, že vzhledem k tomu, že jednotlivé vznikající dráhy jsou základním stavebním kamenem při tisku, je žádoucí jejich optimalizace, která může předejít vzniku nežádoucích vad na konečném výrobku.

Jako další možnost výzkumu doporučuji ověření optimálních parametrů tisku pro jedno vektorové dráhy i pro jiné materiály, tak aby se co nejvíce zamezilo vzniku již zmíněných nežádoucích jevů a splnily se požadavky na kvalitu produktů.

Seznam použité literatury

- [1] LIGON, Samuel Clark et al., 2017. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Chemical Reviews. 117(15), 10212-10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665.
- [2] D. Wang , Y. Yang , R. Liu , D. Xiao , and J. Sun , “ Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM),” J. Mater. Process. Technol. 213(10), 1734–1742 (2013)
- [3] GAO, Wei et al., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design. 69, 65-89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001. ISSN 00104485.
- [4] ISLAS RUIZ DDS, Ma. del Socorro et al., 2015. Fundamentals of Stereolithography, an Useful Tool for Diagnosis in Dentistry. Odontos - International Journal of Dental Sciences [online]. 17(2), 15-21 [cit. 2021-4-19]. DOI: 10.15517/ijds.v17i2.20730. ISSN 2215- 3411. Dostupné z: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/Odontos/article/view/20730>
- [5] HOFMANN, Manfred et al., 2014. 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials. ACS Macro Letters [online]. 3(4), 382-386 [cit. 2021-4-19]. DOI: 10.1021/mz4006556. ISSN 2161-1653. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/mz4006556>
- [6] ISO/ASTM 52900:2015. ISO (the International Organization for Standardization). [Online] 2015. [cit. 2021-4-19.] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed1:v1:en>.
- [7] Redwood, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. 3D HUBS. [Online] [cit. 2021-4-19] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturingtechnologies-overview>.
- [8] Binder Jetting. About Additive Manufacturing [online]. [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <http://canadamakes.ca/what-is-binder-jetting/>
- [9] Binder Jetting. Binder Jetting (BJ) [online]. [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting#readadvantages>
- [10] HAJNÝŠ, Jiří. Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta

strojní, VŠB-TU Ostrava, 122 stran, 64 obrázků, 29 tabulek. Školitel: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

[11] Přehled technologií 3D tisku. dk metal prominent s.r.o. [Online] 2021. [cit. 2021-4-19] <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>.

[12] OLAKANMI, E. O., COCHRANE, R. F., DALGARNO K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. Progress in Materials Science, 2015, vol. 74, s. 401–477. ISSN 0079-6425.

[13] SIDAMBE, Alfred. Schematický přehled cyklu selektivního tavení laserem (SLM). In: Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium BAKALÁŘSKÁ PRÁCE ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE Použití aditivních technologií při výrobě dílů pro energetiku 44 Implants—A Review [online]. [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269836411_Biocompatibility_of_Advanced_Manufactured_Titanium_Implants-A_Review?_sg=64wBiyueChteoq6bnLO_8GVzx9oIH7QP8cGRofimyPARazHpVayocEgC2aMYtdmroE93CwTYQ

[14] Wigand, J. T.; Winey, C. M., III; Varanka, M. (Solidscape, Inc.) Method and Apparatus for Fabricating Three Dimensional Models. U.S. Patent 7700016, 2010.

[15] Metal 3D Printing Processes - Directed Energy Deposition (DED) [online]. March 22, 2018 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://news.3deo.co/metal-3d-printing-processes-directed-energydeposition-ded>

[16] Selective Deposition Lamination (SDL). 3D Printing Industry. [Online] [cit. 2021-4-19] <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>.

[17] Selective Laser Melting. Register | Member Portal TWI Ltd [online]. 2017 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/capabilities/joiningtechnologies/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>

[18] EANE, R. B. Metal Powder Effects on Selective Laser Sintering. PhD thesis. University of Leeds, 2002, pp. 236.

[19] HRADIL, D. Mechanicko strukturní charakteristiky materiálů vyrobených metodou SLM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 87 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D..

- [20] SIMONELLI, M., TUCK, C., ABOULKHAIR, N. T., MASKERY, I., ASHCROFT, I., WILDMAN, R. D., HAGUE, A. R. A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. In: Metallurgical and Materials Transactions A (2015). doi: 10.1007/s11661-015-2882-8.
- [21] OLAKANMI, E. O., COCHRANE, R. F., DALGARNO K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. Progress in Materials Science, 2015, vol. 74, s. 401–477. ISSN 0079-6425.
- [22] BUCHBINDER, D., et al. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. Physics Procedia, 2011, vol. 12, s. 271–278. ISSN 1875-3892
- [23] QIU, Ch., et al. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. Acta Materialia, 2015, vol. 96, s. 72-79. ISSN 1359-6454.
- [24] EANE, R. B. Metal Powder Effects on Selective Laser Sintering. PhD thesis. University of Leeds, 2002, pp. 236.
- [25] TOLOCHKO, N. K., KHLOPKOV, Y. V., MOZZHAROV, S. E., IGNATIEV, M. B., LAOUI, T. a TITOV, V. I. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering". In: Rapid Prototyping Journal 6.3 (2000), pp. 155. doi: 10.1108/13552540010337029.
- [26] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. Úvod do laserové techniky. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1108- 9.
- [27] JHABVALA, Jamasp, Eric BOILLAT, Thibaud ANTIGNAC a Rémy GLARDON. On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process. Virtual and Physical Prototyping [online]. 2010, 5(2), 99-109 [cit. 2021-2-03]. DOI: 10.1080/17452751003688368. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452751003688368>
- [28] JAKEŠ, Jakub. Vliv strategie tavení kovového prášku při 3D tisku na mechanické vlastnosti prototypů: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 59 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.
- [29] Introduction to Additive Manufacturing Brochure. Epna [online]. [cit. 2021-4-11]. Dostupné z: <http://www.epma.com/additive-manufacturing>
- [30] ZETKOVÁ, Ivana. Problematika výroby malých strojních kovových součástí 3D tiskem [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2021-05-04]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.

Introduction to Additive Manufacturing Brochure. Epna [online]. [cit. 2021-4-11]. Dostupné z: <http://www.epma.com/additive-manufacturing>

[31] DEEV, A. A., KUZNETCOV, P. A., PETROV, S.N. Anisotropy of Mechanical Properties and its Correlation with the Structure of the Stainless Steel 316L Produced by the SLM Method, Physics Procedia, Volume 83, 2016, Pages 789-796, ISSN 1875-3892

[32] DEBROY, T., H.L. WEI, J.S. ZUBACK, T. MUKHERJEE, J.W. ELMER, J.O MILEWSKI a A.M. BEESE. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Progress in Materials Science [online]. 2018, vol. 92, s. 112-224 [cit. 2021-2-01]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172#f0005>

[33] GU, Dongdong a Yifu SHEN. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. Materials & Design [online]. 2009, vol. 30, no.8, s. 2903-2910 [cit. 2021-02-08]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909000181?via%3Dihub#fig6>

[34] CHAWLA, N. a X. DENG. Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels. Materials Science and Engineering: A [online]. 2005, vol. 390, s. 98-112 [cit. 2021-2-25]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509304010111>

[35] *Centrum 3D tisku, 3D skenování a konstruování* [online]. In: . [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://info.sso.vsb.cz/cz.vsb.edison.info.web/attachment/AM%20Protolab%20inovace.pdf?attachmentId=31001https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319340726>

[36] DURSUN, Gokhan, Samuel IBKWE, Guoqiang LI, Patrick MENSAH, Ghanashyam JOSHI a Dwayne JERRO, 2020. Influence of laser processing parameters on the surface characteristics of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting: Leveraging Innovation through Online Idea Competitions. Materials Today: Proceedings. 1999, 26(3), 387-393. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.12.061

[37] SHI, Wentian, Peng WANG, Yude LIU, Yanjun HOU a Guoliang HAN. Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 µm layer thickness. Powder Technology [online]. 2020, 360, 151-164 [cit. 2021-5-11]. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.059. ISSN 00325910. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591019307818>

[38] STAŠIĆ, J., D. BOŽIĆ, Oliver GASSMANN a Marianna OBRIST, 2016. The effect of NiB additive on surface morphology and microstructure of 316L stainless steel single tracks and layers obtained

by SLM: Leveraging Innovation through Online Idea Competitions. Surface and Coatings Technology. 1999, 307(3), 407-417. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2016.09.019

[39] Renishaw-am-400/. Wwww.aniwaa.com [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/renishaw-am-400/>

[40] Alicona IfiniteFokus G5. Alicona.com [online]. 2020 [cit. 2020-5-14]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>

[41] Renishaw AM400. Renishaw.com [online]. 2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ss-316l-0407-powder-for-additivemanufacturing--90802>

[42] Iron-based 3D Printing Powder. In: NANOTRUN [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.kmpass.com/ironbased/Supply-3D-Printing-Powder-SS-316L-Stainless-Steel-Powder-316L.html>

Poděkování

Závěrem bych rád poděkoval své rodině za podporu, jak během psaní této diplomové práce, tak i během celého studia. Velké poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Hajnyšovi, Ph.D., za jeho odbornou pomoc, ochotu a cenné rady.

- *Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „Specifický výzkum moderních technologií výroby“, reg. č. „SP2021/100“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.*
- *Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „DMS Inovativní a aditivní technologie výroby – nová technologická řešení 3D tisku kovů a kompozitních materiálů“, reg. č. „CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008407“*